



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



INSTITUTO UNIVERSITARIO DE MICROGRAVEDAD “IGNACIO DA RIVA”
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AERONÁUTICA Y DEL ESPACIO

MASTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES
CURSO 2018-2019

Estructuras de Uso Espacial

Diseño y modelización de la estructura de un microsatélite

Borja del Campo López
Pablo Ruiz Royo

24 de mayo de 2019

Índice

1. Introducción	5
2. Dimensionamiento de la bandeja	5
2.1. Descripción de la bandeja	5
2.1.1. Modelo 1 de la bandeja	7
2.1.2. Modelo 2 de la bandeja	8
2.1.3. Modelo 3 de la bandeja	9
2.2. Resultados de los análisis de la bandeja	10
2.2.1. Proceso de optimización	10
2.2.2. Análisis de modos propios de la bandeja óptima	12
2.2.3. Análisis estático de la bandeja óptima	13
3. Análisis de la estructura del microsatélite	18
3.1. Descripción del modelo resultante	18
3.2. Resultados de los análisis	21
3.2.1. Chequeos	21
3.2.2. Análisis de modos propios	23
3.2.3. Análisis estáticos	24
3.2.4. Análisis de vibraciones sinusoidales	31
3.2.5. Análisis de vibraciones aleatorias	35
3.2.6. Análisis de tornillos	39
4. Conclusiones	48
5. Bibliografía	49

Índice de figuras

1. Configuración de rigidizadores del modelo 1 de bandeja	7
2. Sección de los rigidizadores interiores del modelo de bandeja 1	7
3. Sección de los rigidizadores exteriores del modelo de bandeja 1	7
4. Configuración de rigidizadores del modelo 2 de bandeja	8
5. Sección de los rigidizadores interiores del modelo de bandeja 2	8
6. Sección de los rigidizadores exteriores del modelo de bandeja 2	8
7. Configuración de rigidizadores del modelo 3 de bandeja	9
8. Sección de los rigidizadores interiores del modelo de bandeja 3	9
9. Sección de los rigidizadores exteriores del modelo de bandeja 3	9
10. Densidad de rigidizadores interiores de la bandeja definitiva	10
11. Densidad de elementos de la placa de la bandeja definitiva	11
12. Ubicación de los puntos de unión de la masa puntual a la bandeja definitiva	11
13. Comportamiento del primer modo propio del sistema bandeja-equipos electrónico	12
14. Esfuerzos de Von Mises en la bandeja en el caso longitudinal de 80g	13
15. Esfuerzos axiales en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g	13
16. Esfuerzos flectores en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g	13
17. Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g	14
18. Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g	14
19. Desplazamientos de la bandeja en el caso longitudinal de 80g	14
20. Esfuerzos de Von Mises en la bandeja en el caso lateral de 50g	15
21. Esfuerzos axiales en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g	15
22. Esfuerzos flectores en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g	15
23. Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g	16
24. Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g	16
25. Desplazamientos de la bandeja en el caso lateral de 50g	16
26. Márgenes de seguridad yield y último teniendo en cuenta factores correctores	17

27.	Estructura del microsatélite	18
28.	Visualización global de la estructura del microsatélite	18
29.	Detalle del interior de la estructura del microsatélite	19
30.	Dimensiones en m de la sección de las vigas en L del microsatélite	19
31.	Constantes de rigidez axial y a torsión de la propiedad CBUSH	20
32.	Ubicación de los elementos CBUSH en la bandeja inferior A	20
33.	Chequeo de carga gravitatoria	21
34.	Chequeo de frecuencias propias como sólido rígido	21
35.	Chequeo de energía de deformación 1	21
36.	Chequeo de energía de deformación 2	22
37.	Chequeo de energía de deformación 3	22
38.	Chequeo de energía de deformación 4	22
39.	Comportamiento del primer modo propio lateral del satélite completo	23
40.	Comportamiento del primer modo propio longitudinal del satélite completo	23
41.	Detalle del comportamiento del primer modo propio longitudinal del satélite completo	23
42.	Esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en X	24
43.	Detalle de los esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en X	24
44.	Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en X	24
45.	Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en X	25
46.	Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en X	25
47.	Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en X	25
48.	Esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Y	26
49.	Detalle de los esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Y	26
50.	Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Y	26
51.	Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Y	27
52.	Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en Y	27
53.	Esfuerzos del análisis estático en el caso de carga en Y	27
54.	Esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Z	28
55.	Detalle de los esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Z	28
56.	Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Z	28
57.	Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Z	29
58.	Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en Z	29
59.	Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en Z	29
60.	Condiciones de los diferentes análisis sinusoidales aplicados al satélite	31
61.	Esfuerzos de Von Mises del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g	31
62.	Esfuerzos axiales en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g	31
63.	Esfuerzos flectores en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g	32
64.	Esfuerzos combinados en los elementos beam del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g	32
65.	Esfuerzos de Von Mises del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g	33

66.	Detalle de los esfuerzos de Von Mises del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g	33
67.	Esfuerzos axiales en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g	33
68.	Esfuerzos flectores en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g	34
69.	Esfuerzos combinados en los elementos beam del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g	34
70.	Condiciones de los análisis de vibraciones aleatorias de la estructura del microsatélite . . .	35
71.	Esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en X a 0.0727 g ² /Hz	35
72.	Detalle de los esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en X a 0.0727 g ² /Hz	35
73.	Esfuerzos combinados RMS en los elementos 1D beam en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en X a 0.0727 g ² /Hz	36
74.	Esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en Y a 0.0727 g ² /Hz	36
75.	Detalle de los esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en Y a 0.0727 g ² /Hz	36
76.	Esfuerzos combinados RMS en los elementos 1D beam en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en Y a 0.0727 g ² /Hz	37
77.	Esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal en Z a 0.0727 g ² /Hz	37
78.	Detalle de los esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal en Z a 0.0727 g ² /Hz	37
79.	Esfuerzos combinados RMS en los elementos 1D beam en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal en Z a 0.0727 g ² /Hz	38
80.	Propiedades físicas de los tornillos empleados en la interfaz lanzador-microsatélite	39
81.	Propiedades físicas de los tornillos empleados en la interfaz lanzador-microsatélite	39

Índice de tablas

1.	Características comunes a todos los modelos de bandeja	5
2.	Propiedades de los materiales elegidos	6
3.	Frecuencias fundamentales y masas de la bandeja en los tres modelos para cada material .	10
4.	Características de los rigidizadores interiores y exteriores	11
5.	Material y espesor de la placa de la bandeja definitiva	11
6.	Cantidad de nodos del modelo FEM de la bandeja definitiva	12
7.	Cantidad de elementos por tipos del modelo FEM de la bandeja definitiva	12
8.	Márgenes de seguridad de la tensión de Von Mises en la bandeja definitiva	17
9.	Cantidad de elementos por tipos del modelo FEM del microsatélite completo	20
10.	Cantidad de nodos del modelo FEM del microsatélite completo	20
11.	Márgenes de seguridad del análisis estático en el eje X del modelo FEM del microsatélite completo	30
12.	Márgenes de seguridad del análisis estático en el eje Y del modelo FEM del microsatélite completo	30
13.	Márgenes de seguridad del análisis estático en el eje Z del modelo FEM del microsatélite completo	30
14.	Márgenes de seguridad del análisis sinusoidal del microsatélite en el eje X a 65 Hz y a 2.5g	34
15.	Márgenes de seguridad del análisis sinusoidal del microsatélite en el eje Z a 100 Hz y a 3.75g	34
16.	Márgenes de seguridad del análisis random del microsatélite en el eje X a 0.0727g ² /Hz . .	38
17.	Márgenes de seguridad del análisis random del microsatélite en el eje Y a 0.0727g ² /Hz . .	38
18.	Márgenes de seguridad del análisis random del microsatélite en el eje Z a 0.0727g ² /Hz . .	38
19.	Márgenes de seguridad del tornillo 1	40
20.	Márgenes de seguridad del tornillo 2	41
21.	Márgenes de seguridad del tornillo 3	42
22.	Márgenes de seguridad del tornillo 4	43

23.	Márgenes de seguridad del tornillo 5	44
24.	Márgenes de seguridad del tornillo 6	45
25.	Márgenes de seguridad del tornillo 7	46
26.	Márgenes de seguridad del tornillo 8	47

1. Introducción

En este trabajo se ha realizado un modelo de elementos finitos de la estructura de un microsatélite de características similares al UPMSat-2. Todo el proceso desarrollado se puede dividir en dos partes bien diferenciadas.

En la primera de ellas se ha abordado el diseño optimizado de las bandejas que forman parte de la estructura del microsatélite. Para ello, a partir de las características concretas fijadas de la bandeja en el enunciado para el grupo número 8 y los parámetros de los rigidizadores de las bandejas del UPMSat-2, se ha seguido un proceso iterativo en el que se han variado ciertas características de la bandeja, como el espesor de la misma o las dimensiones y el tipo de rigidizadores empleados, con la finalidad de encontrar aquella que cumpla los requisitos de rigidez fijados tratando en todo momento de minimizar la masa de dicha bandeja. Después de llevar a cabo los análisis pertinentes para la verificación del cumplimiento de los requisitos aplicados a la bandeja, se han calculado los márgenes de seguridad correspondientes a cada uno de los casos planteados.

La segunda parte del trabajo consistirá en la elaboración del modelo de elementos finitos completo de un microsatélite de forma que cumpla una serie de requisitos en cuanto a rigidez axial y lateral. Para ello, se ha utilizado la bandeja resultante de la primera fase del trabajo como modelo para las bandejas de la estructura. Esta además está compuesta por una serie de vigas con perfil en L que actúan a modo de separados entre bandejas, por los paneles de cierre, por los equipos embarcados en el microsatélite y por los elementos de unión entre todos estos componentes. Como en la fase anterior, se han calculado los diferentes márgenes de seguridad tanto en la propia estructura como en los tornillos. Una vez el microsatélite ha cumplido con las exigencias fijadas de rigidez axial y lateral, se van a llevar a cabo una serie de análisis adicionales. El primero de ellos es el estático, que se va a realizar en los tres ejes. El siguiente corresponde al análisis de vibraciones sinusoidales, tanto longitudinal como lateral. Finalmente, se van a llevar a cabo los análisis longitudinal y lateral de vibraciones aleatorias.

Por último, se va a analizar el proceso que se ha realizado durante todo el trabajo, comentando aquellos puntos en los que se han encontrado dificultades adicionales y resaltando los resultados más relevantes que se han alcanzado. Posteriormente, se presentarán las conclusiones que se han extraído a lo largo del trabajo.

2. Dimensionamiento de la bandeja

2.1. Descripción de la bandeja

A continuación, se va a realizar una descripción de cada una de las bandejas que se han propuesto a la hora de encontrar el diseño más óptimo desde el punto de vista másico. Cada una de ellas tiene unas características físicas y geométricas diferentes pero todas tienen unos rasgos en común. Estas características quedan recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1: Características comunes a todos los modelos de bandeja

Forma	Ancho [mm]	Largo [mm]	Secc Rig Ext	Config Rig Int	Masa Eq [kg]
Cuadrada	600	600	Rectangular	Isogrid	10

Por otra parte, los modelos FEM de todas las bandejas propuestas tienen una estructura similar que se va a describir a continuación. En primer lugar, se ha fijado una determinada densidad de rigidizadores interiores para cada modelo diferente. Una vez se ha fijado esto, se ha generado el mínimo número de triángulos del isogrid para generar el resto de la geometría de la bandeja únicamente mediante traslaciones. Antes de realizar ninguna traslación se han creado las superficies correspondientes a los triángulos con el fin de no tener que repetir el proceso para cada uno de ellos.

Antes de crear ningún elemento se han generado los materiales que se van a emplear y las propiedades de los elementos. Los materiales elegidos son dos tipos de aleaciones de aluminio que quedan recogidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de los materiales elegidos

	E [GPa]	Poisson	Densidad [kg/m ³]	Yield [MPa]	Ultimate [MPa]
EN-AW-7075-T6	71	0.33	2800	503	572
EN-AW-6061-T6	69	0.33	2700	276	310

Por otra parte, las propiedades de los elementos necesarias para definir el modelo son la CONM2 para la representar la masa puntual del equipo que se encuentra ubicado sobre la bandeja, la CQUAD4 con su material asignado y su espesor definido para representar los elementos de la placa plana y dos propiedades CBAR para representar los rigidizadores tanto exteriores como interiores. En esta última propiedad es necesario definir el material usado, el tipo de sección con sus dimensiones, y la orientación y el offset del elemento. Cabe destacar que el offset de los rigidizadores se tiene que seleccionar de tal manera que la masa puntual quede en el otro lado de la bandeja.

Ahora sí, ya se dispone de lo necesario para empezar a definir los elementos del modelo FEM. Pero antes, se van a definir grupos en los que se va a compartimentar los elementos del modelo por comodidad y facilidad a la hora de manejarlo. En primer lugar, se genera una semilla de malla tanto en los elementos 2D tipo shell como en los elementos 1D tipo beam, para posteriormente definir el mallado de la bandeja completo. Es necesario tener en cuenta a la hora de hacer la semilla de malla que los nodos de los elementos 1D de los rigidizadores tienen que ser coherentes con los de los elementos 2D de la placa. Por último, se realizan las verificaciones pertinentes de *Equivalence*, bordes libres, elementos duplicados y la correcta orientación de las normales a los elementos. Para representar la unión de la masa puntual CONM2 con la bandeja se ha utilizado un MPC tipo RBE2, cuya función consiste en ligar los grados de libertad de un nodo independiente en el que se encuentra dicha masa con los de una serie de nodos dependientes en la bandeja (4 en este caso). La selección de estos nodos dependientes es crucial de cara a cumplir con los requisitos de rigidez que se han fijado. Cuanto más cercanos al centro de la bandeja se encuentren estos puntos, más baja será la frecuencia propia fundamental del sistema masa puntual-bandeja. La explicación a este fenómeno se debe a que el efecto de la masa se distribuye mejor cuanto más exteriores se encuentren estos puntos, teniendo en cuenta que la masa puntual se ubica centrada y a 80 mm de la bandeja. Por lo tanto, estos se seleccionarán de forma que representen adecuadamente al equipo sin penalizar la rigidez del sistema en exceso.

Finalmente, se va a definir un caso de carga con la condición de contorno de apoyo simple en todos los puntos del perímetro de la bandeja. Aunque se van a realizar dos tipos de análisis, estático y de modos propios, el diseño de la bandeja se va a considerar válido cuando se cumpla el requisito de rigidez que consiste en que la primera frecuencia propia se encuentre entre los 150 y 175 Hz.

Después de esta descripción genérica del proceso seguido para la consecución del FEM de la bandeja y del propio modelo FEM, se va a describir detalladamente cada una de las opciones que se han considerado.

2.1.1. Modelo 1 de la bandeja

Este modelo de bandeja es el que presenta una densidad de rigidizadores interiores menor. En la siguiente figura se puede ver la configuración de rigidizadores interiores elegida y el mallado diseñado para esta primera iteración.

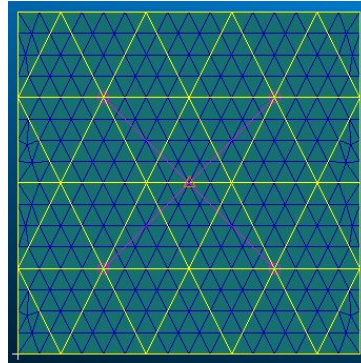


Figura 1: Configuración de rigidizadores del modelo 1 de bandeja

Estos presentan un tipo de sección y dimensiones en m que son los que se pueden apreciar en la siguiente figura.

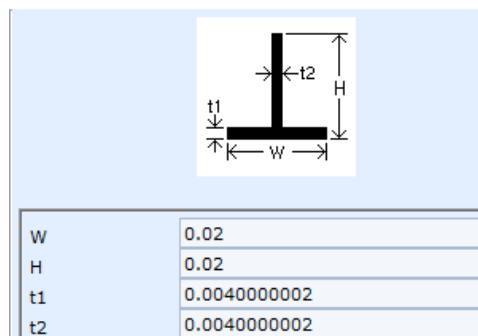


Figura 2: Sección de los rigidizadores interiores del modelo de bandeja 1

Por otro lado, los rigidizadores exteriores de sección rectangular tienen las siguientes dimensiones en m.

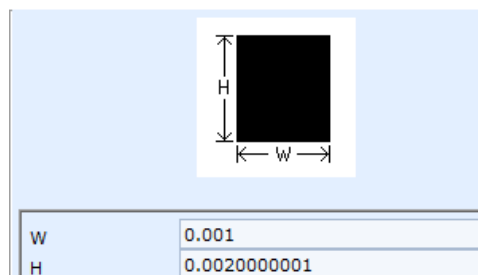


Figura 3: Sección de los rigidizadores exteriores del modelo de bandeja 1

De los dos materiales propuestos, el seleccionado tanto para la placa, cuyo espesor es de 1 mm, como para los rigidizadores es la aleación de aluminio EN-AW-7075-T6. Se ha decidido utilizar el mismo material para todas las partes de la bandeja con el objetivo de fabricar una pieza integral con el consiguiente ahorro en el coste de fabricación y la mejora en las propiedades mecánicas.

2.1.2. Modelo 2 de la bandeja

Este modelo de bandeja presenta una densidad de rigidizadores interiores intermedia. En la siguiente figura se puede ver dicha configuración de rigidizadores interiores elegida y el mallado diseñado para esta segunda iteración.

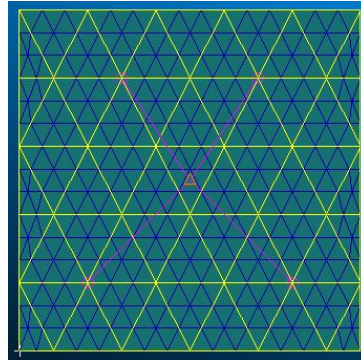


Figura 4: Configuración de rigidizadores del modelo 2 de bandeja

Además, estos presentan un tipo de sección y dimensiones en m que son los que se pueden apreciar en la siguiente figura.

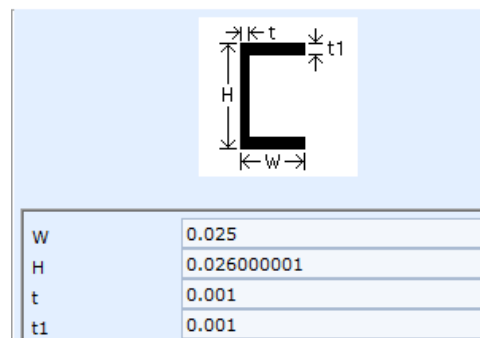


Figura 5: Sección de los rigidizadores interiores del modelo de bandeja 2

Por otro lado, los rigidizadores exteriores de sección rectangular tienen las siguientes dimensiones en m.

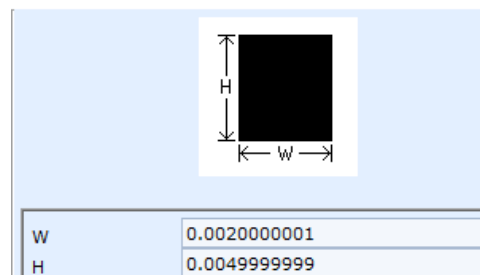


Figura 6: Sección de los rigidizadores exteriores del modelo de bandeja 2

El material elegido tanto para la placa, cuyo espesor es de 1 mm, como para los rigidizadores es la aleación de aluminio EN-AW-7075-T6. El motivo de emplear el mismo material para las diferentes partes es el expuesto para el modelo 1.

2.1.3. Modelo 3 de la bandeja

Este modelo de bandeja presenta la densidad de rigidizadores interiores más alta de los tres. En la siguiente figura se puede ver la configuración de rigidizadores interiores elegida y el mallado diseñado para esta tercera iteración.

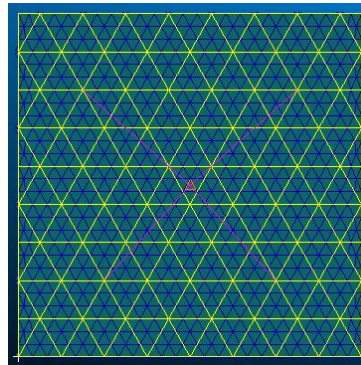


Figura 7: Configuración de rigidizadores del modelo 3 de bandeja

Estos presentan un tipo de sección y dimensiones en m que son los que se pueden apreciar en la siguiente figura.

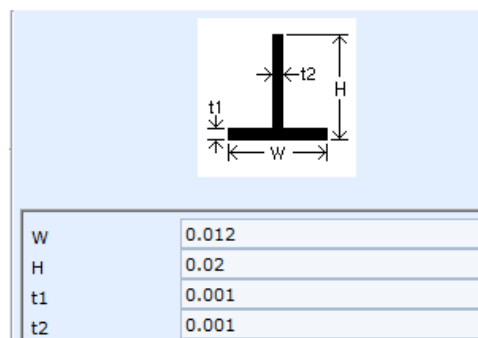


Figura 8: Sección de los rigidizadores interiores del modelo de bandeja 3

Por otra parte, los rigidizadores exteriores de sección rectangular tienen las siguientes dimensiones en m.

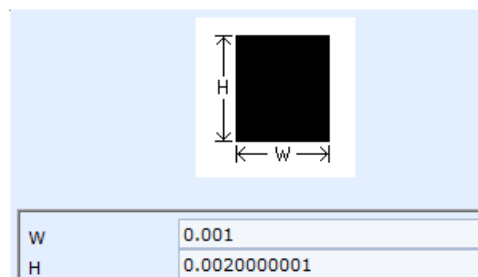


Figura 9: Sección de los rigidizadores exteriores del modelo de bandeja 3

El material elegido tanto para la placa, cuyo espesor es de 1 mm, como para los rigidizadores es la aleación de aluminio EN-AW-7075-T6. El motivo para el uso de un material único en toda la bandeja es el mismo que para las anteriores opciones.

2.2. Resultados de los análisis de la bandeja

2.2.1. Proceso de optimización

El proceso de optimización que se ha seguido tiene como punto de partida las dimensiones de la bandeja del UPMSat-2. A partir de aquí, se han realizado tres modelos diferentes atendiendo a la densidad de rigidizadores interiores empleada, y para cada uno de estos modelos se han empleado dos materiales distintos.

Por otra parte, el tipo de sección de los rigidizadores se ha ido variando hasta encontrar el más adecuado hasta llegar a los que se han mostrado en el apartado anterior. Llegados a este punto, se ha seguido un proceso iterativo para modelo en el que se han variado las dimensiones de los rigidizadores exteriores e interiores, así como el espesor de la placa. Cabe destacar que se ha preferido la modificación al alza de los rigidizadores frente a la del espesor de placa. El motivo de esto es que a pesar de tener un gran efecto en el incremento de la frecuencia fundamental del sistema, el aumento del espesor supone un incremento de la masa de la bandeja excesivo.

A continuación, se va a realizar una comparación de los resultados en términos de frecuencias propias que se han obtenido con los tres modelos propuestos. En la siguiente tabla se muestran recogidos los resultados mencionados.

Tabla 3: Frecuencias fundamentales y masas de la bandeja en los tres modelos para cada material

	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	7075	6061	7075	6061	7075	6061
Frecuencia [Hz]	158.58	156.87	154.30	152.56	157.57	155.74
Masa [kg]	3.91	3.77	2.96	2.86	2.39	2.31

En esta tabla se puede apreciar inmediatamente que el modelo 3 que emplea la aleación EN-AW-6061-T6 es el que presenta una menor masa y por lo tanto, el más óptimo desde este punto de vista. Sin embargo, el mismo modelo 3 en su versión de la aleación EN-AW-7075-T6 presenta una frecuencia natural del primer modo propio superior a la de la aleación 6061. A pesar de esto, el modelo 3 que usa la 6061 sigue siendo la opción elegida ya que la disminución de masa es de mayor magnitud (3.5 %) que el incremento de frecuencia (1.5 %), hecho que hace rentable esta decisión.

De esta forma, ya se tiene el modelo de elementos finitos de las bandejas que formarán parte de la estructura del microsátélite que se va a diseñar y analizar en los apartados posteriores. En las imágenes que se muestran a continuación se puede apreciar la densidad de rigidizadores interiores, la densidad de elementos de la placa y la ubicación de los puntos de unión del RBE2 que une la masa puntual con la bandeja.

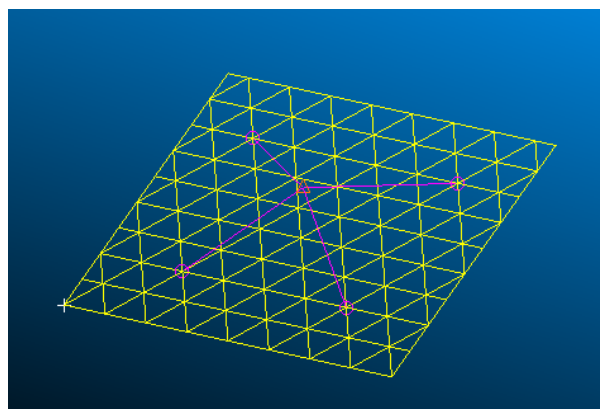


Figura 10: Densidad de rigidizadores interiores de la bandeja definitiva

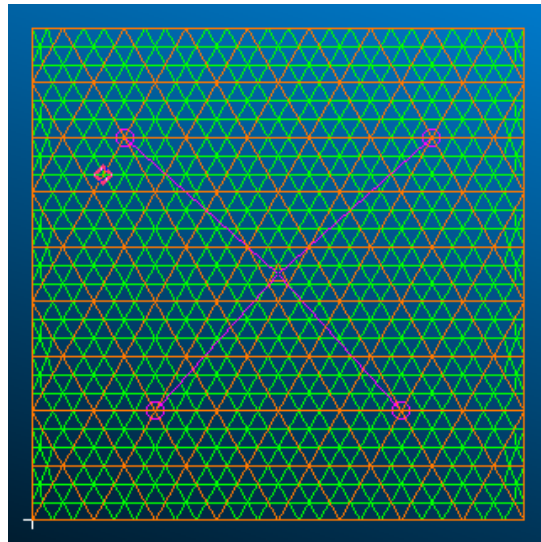


Figura 11: Densidad de elementos de la placa de la bandeja definitiva

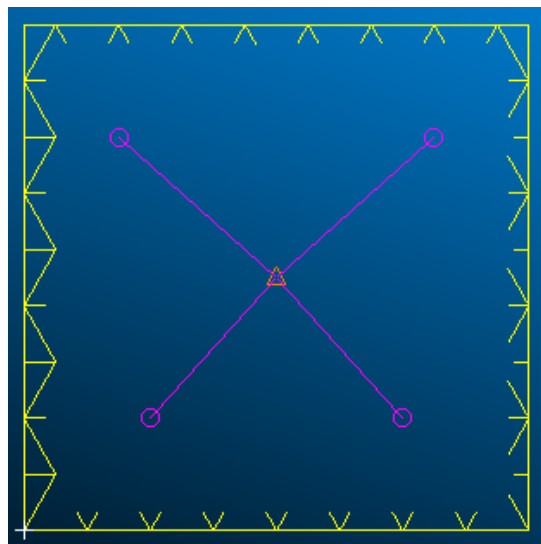


Figura 12: Ubicación de los puntos de unión de la masa puntual a la bandeja definitiva

Finalmente, se van a mostrar una serie de tablas que describen las características más relevantes del modelo FEM de la bandeja definitiva.

Tabla 4: Características de los rigidizadores interiores y exteriores

Rigidizadores Interiores						Rigidizadores Exteriores			
Nº	Sección	h [mm]	w [mm]	t1 [mm]	t2 [mm]	Nº	Sección	h [mm]	w [mm]
24	T Invertida	20	12	1	1	4	Cuadrada	2	1

Tabla 5: Material y espesor de la placa de la bandeja definitiva

Material	Espesor de Placa [mm]
EN-AW-6061-T6	1

Tabla 6: Cantidad de nodos del modelo FEM de la bandeja definitiva

Nodos Totales
780

Tabla 7: Cantidad de elementos por tipos del modelo FEM de la bandeja definitiva

CONM2	TRIA3	BAR2	Totales
1	1358	731	2090

En esta última tabla no se ha incluido el MPC tipo RBE2 porque no es un elemento, simplemente representa una relación entre diferentes nodos del modelo.

Una vez se tiene completamente definida y optimizada la bandeja que se va a usar en pasos posteriores se van a mostrar los resultados obtenidos de los análisis estático y de modos propios.

2.2.2. Análisis de modos propios de la bandeja óptima

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de realizar el análisis de modos propios a la bandeja. Este ya se había llevado a cabo en el proceso de optimización pero ahora se va a mostrar además el comportamiento del primer modo propio asociado a la frecuencia fundamental del sistema bandeja-equipo electrónico. En la siguiente imagen se puede apreciar dicho comportamiento.

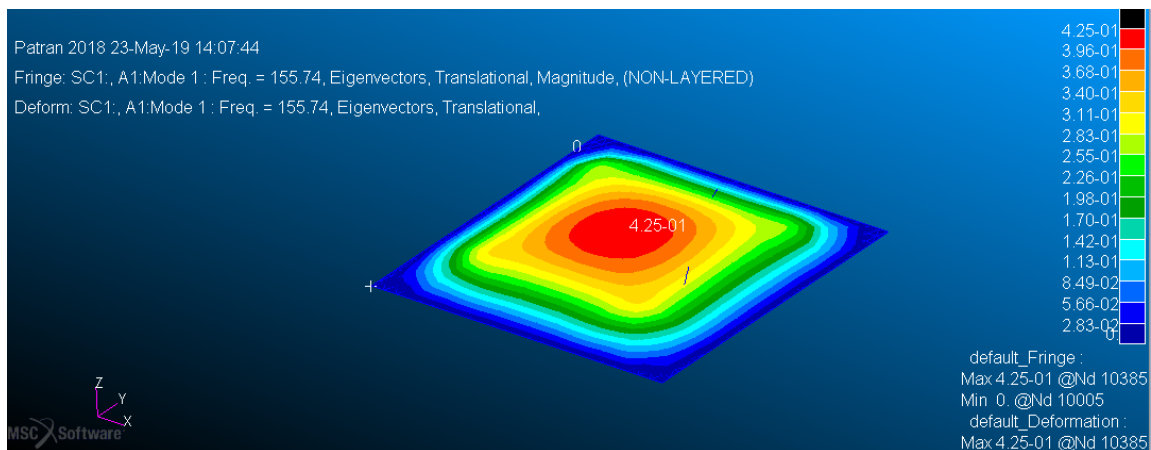


Figura 13: Comportamiento del primer modo propio del sistema bandeja-equipo electrónico

Se puede observar que se trata de un modo transversal a la bandeja como era de esperar por la elevada superficie en comparación con su espesor y masa.

2.2.3. Análisis estático de la bandeja óptima

A continuación se muestran los resultados del análisis estático de la bandeja definitiva. Se han tenido en cuenta dos casos de carga: uno longitudinal de 80g y otro lateral de 50g. En las siguientes imágenes se muestran los resultados en el caso de carga estático longitudinal de 80g.

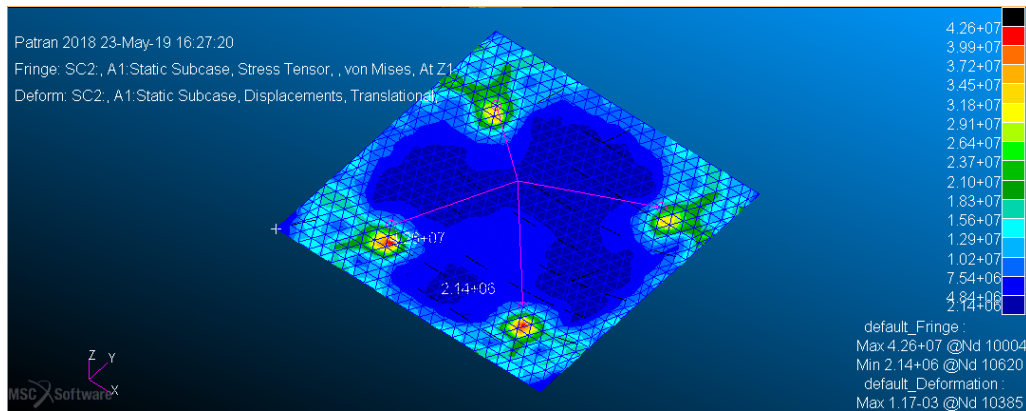


Figura 14: Esfuerzos de Von Mises en la bandeja en el caso longitudinal de 80g

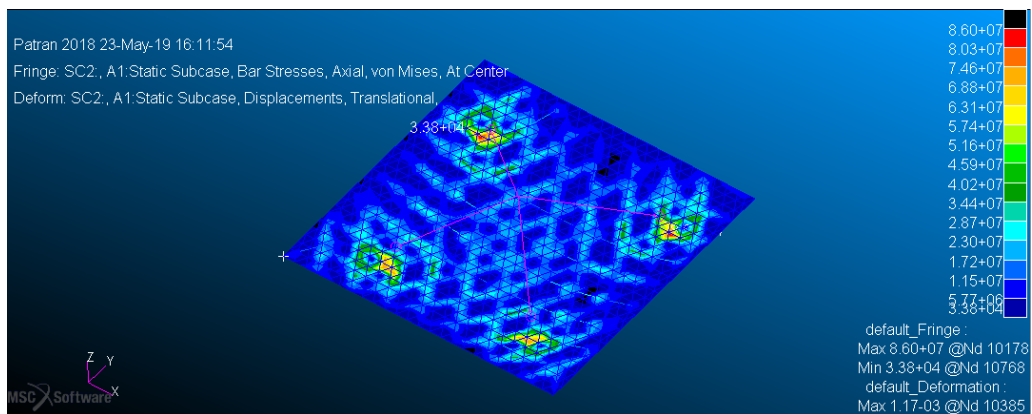


Figura 15: Esfuerzos axiales en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g

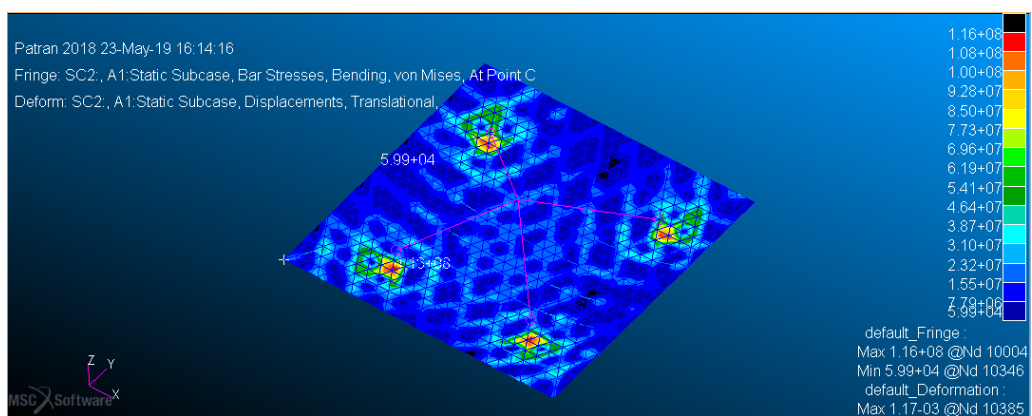


Figura 16: Esfuerzos flectores en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g

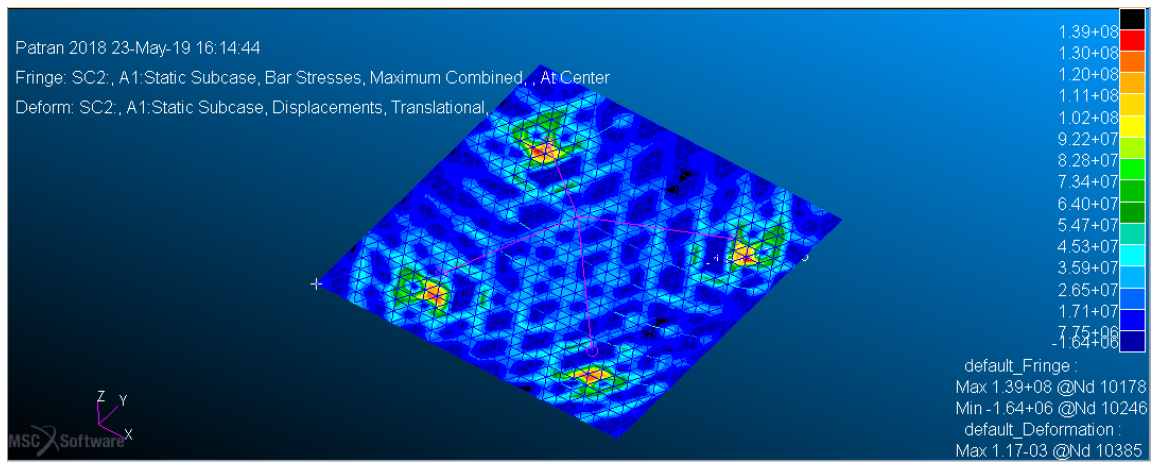


Figura 17: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g

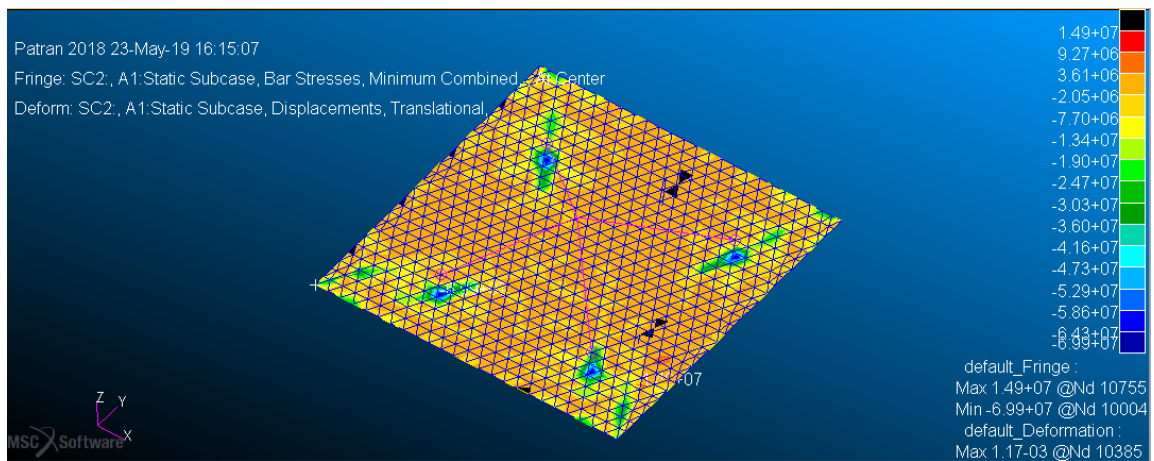


Figura 18: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso longitudinal de 80g

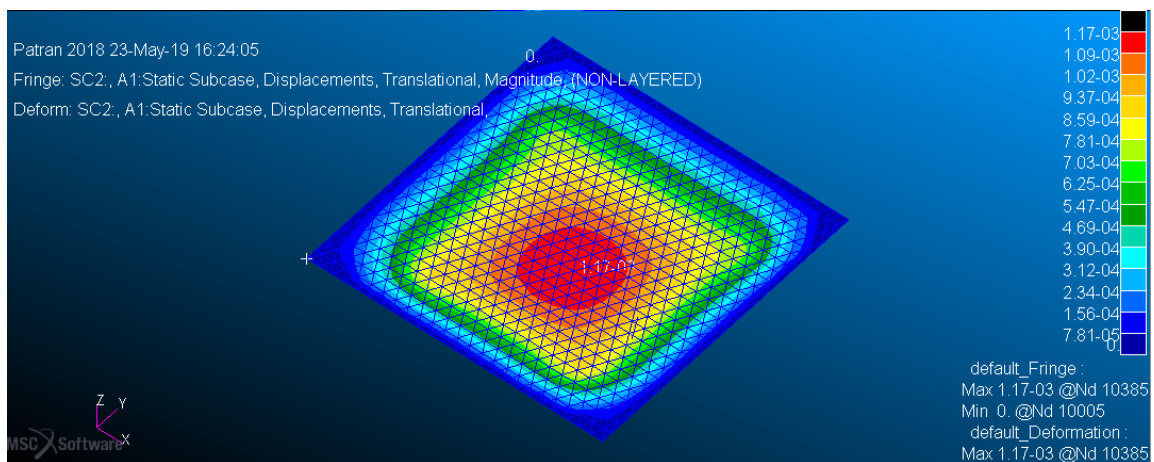


Figura 19: Desplazamientos de la bandeja en el caso longitudinal de 80g

En las siguientes figuras se muestran los mismos gráficos pero para el caso de carga estático lateral de 50g.

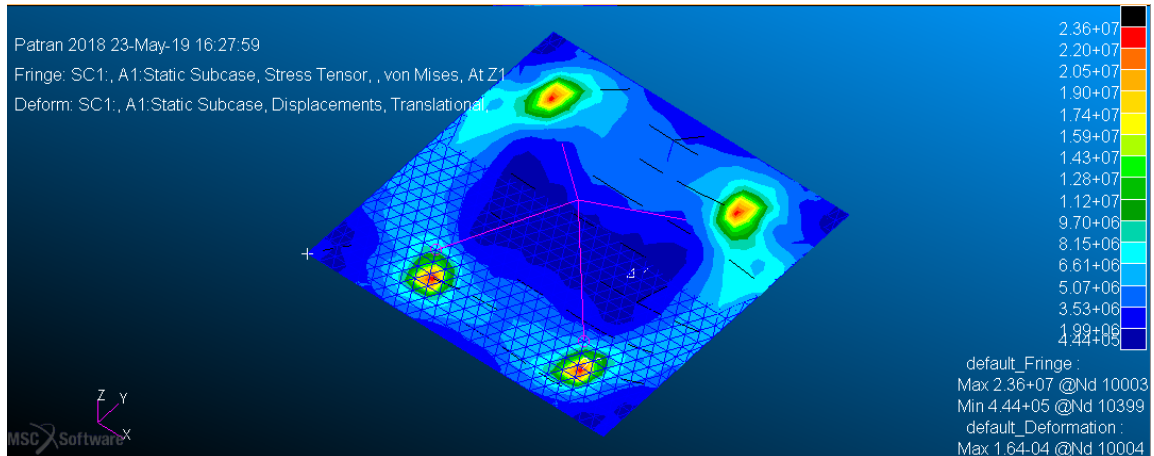


Figura 20: Esfuerzos de Von Mises en la bandeja en el caso lateral de 50g

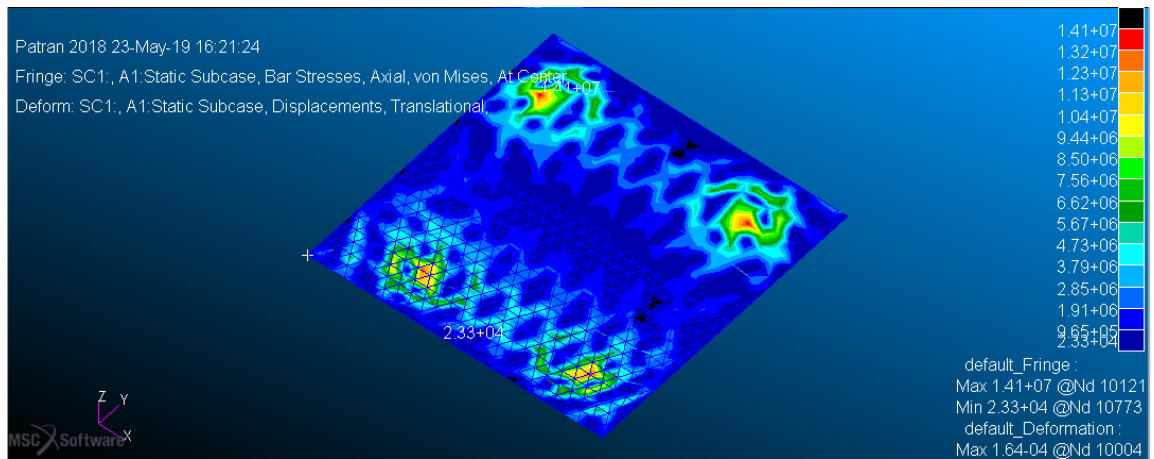


Figura 21: Esfuerzos axiales en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g

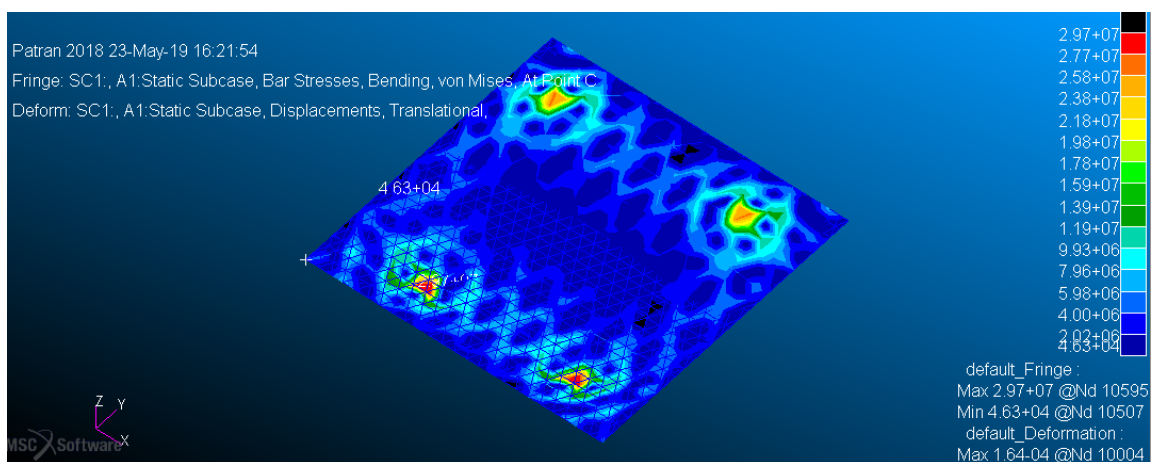


Figura 22: Esfuerzos flectores en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g

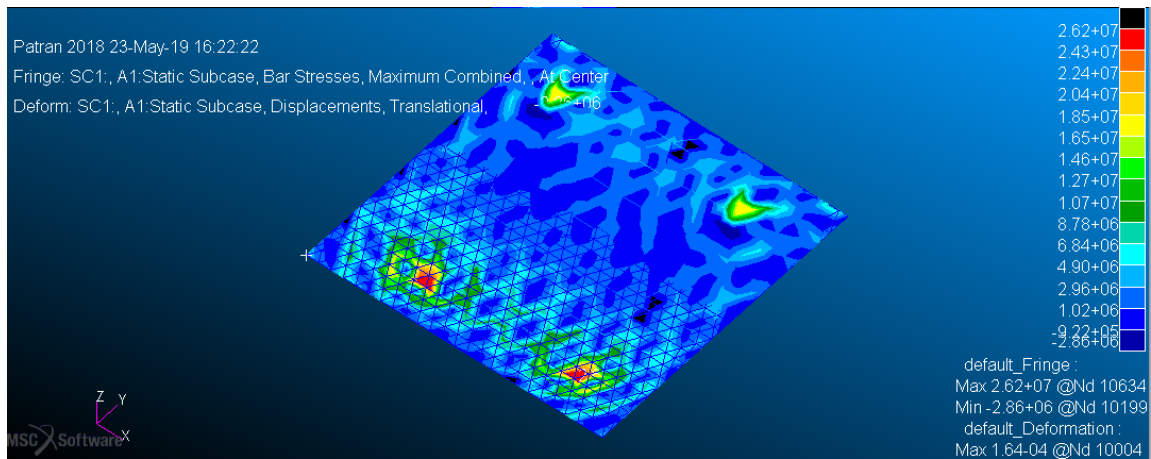


Figura 23: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g

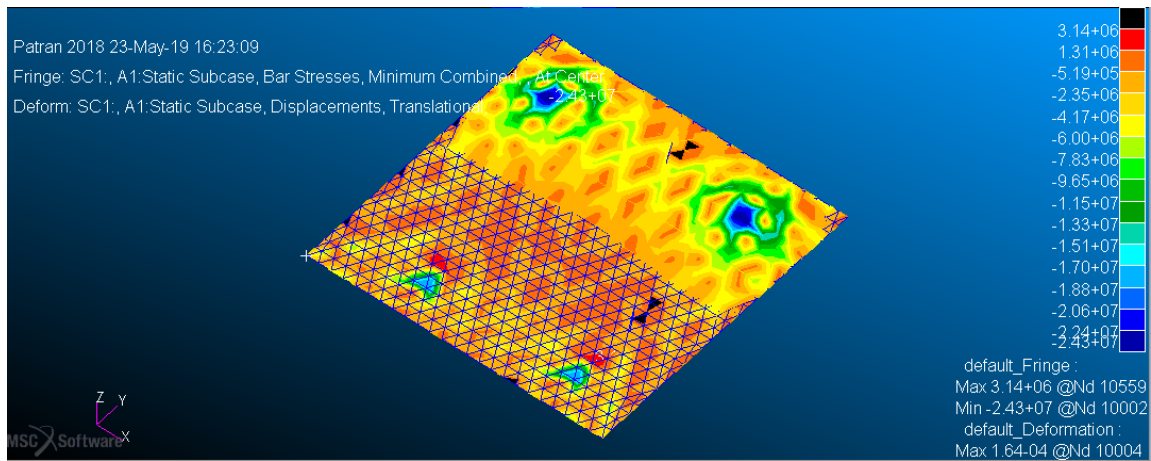


Figura 24: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D de la bandeja en el caso lateral de 50g

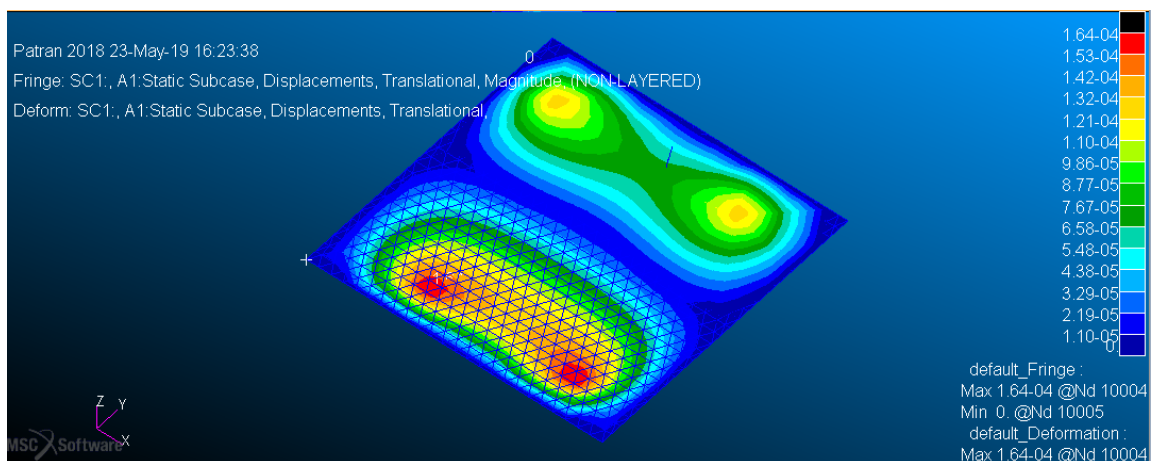


Figura 25: Desplazamientos de la bandeja en el caso lateral de 50g

Con estos resultados, los márgenes de seguridad se van a calcular a continuación teniendo en cuenta que las siguientes expresiones.

$$MoS_y = \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{VM\max} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSY} \right) - 1$$

$$MoS_u = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{VM\max} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSU} \right) - 1$$

Parámetro	Significado	Valor
K_P	Factor de proyecto	1.1
K_M	Factor del modelo	1.2
K_{LD}	Factor de diseño local	1.1
FOSY	Factor de seguridad del límite elástico	1.1
FOSU	Factor de seguridad de la carga última	1.25
σ_y	Límite elástico del material	Depende del material
σ_u	Resistencia última del material	Depende del material
$\sigma_{VM\max}$	Máxima tensión de Von Mises obtenido de un análisis determinado	Solución de cada análisis

Figura 26: Márgenes de seguridad yield y último teniendo en cuenta factores correctores

En la tabla siguiente quedan recogidos los márgenes de seguridad yield y último de los elementos más críticos para los dos casos de carga longitudinal y lateral.

Tabla 8: Márgenes de seguridad de la tensión de Von Mises en la bandeja definitiva

	MoSy	MoSu
Long 80g	0.24	0.23
Lat 50g	4.82	4.75

Finalmente, ya se tiene definido el modelo de elementos finitos que se va a utilizar en la bandeja y se ha estudiado su comportamiento, cumpliendo el requisito de modos propios, por lo que el diseño es válido al pasar una de las dos condiciones que se comentaban en el enunciado. Este modelo se va a utilizar para construir la estructura del microsátélite completo.

3. Análisis de la estructura del microsatélite

3.1. Descripción del modelo resultante

Diseñando la estructura del microsatélite alrededor de la bandeja definida en los apartados anteriores se ha llegado a un modelo como el que se muestra en las imágenes siguientes.

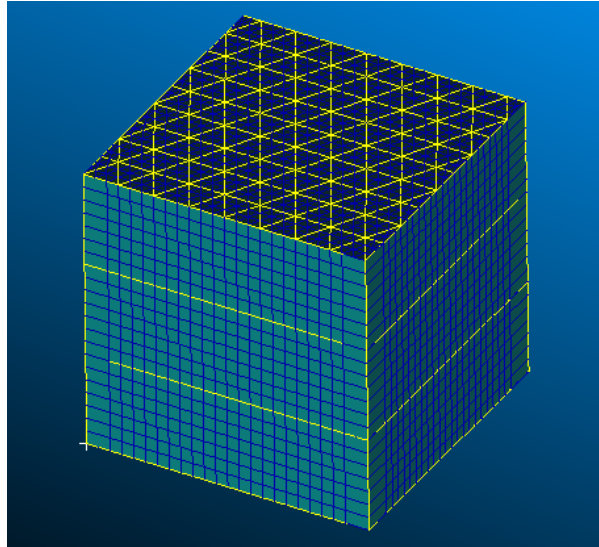


Figura 27: Estructura del microsatélite

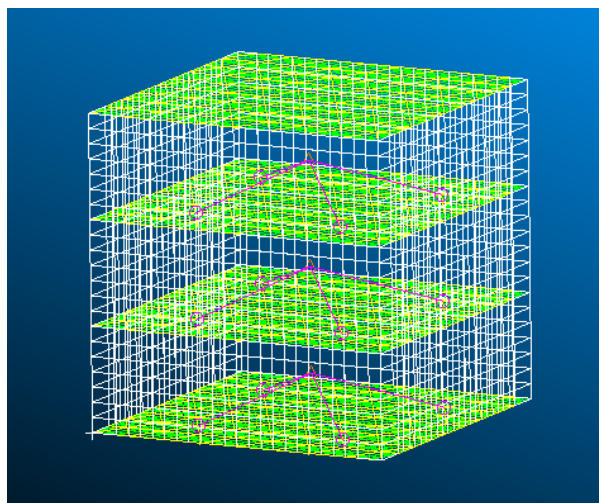


Figura 28: Visualización global de la estructura del microsatélite

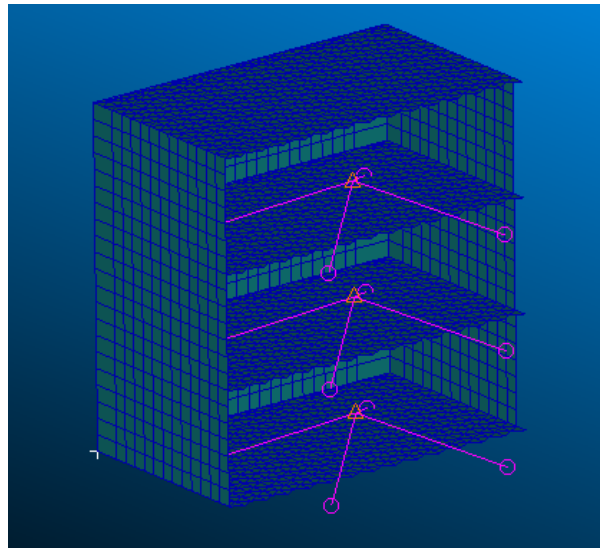


Figura 29: Detalle del interior de la estructura del microsatélite

Este microsatélite está compuesto por cuatro bandejas idénticas correspondientes al modelo obtenido en los apartados previos colocada a 200 mm de separación entre ellas, por cuatro paneles de cierre, por una serie de vigas en L, por los equipos embarcados y por los tornillos de la interfaz del satélite con el lanzador. Las vigas en L son las encargadas de sostener la estructura y de separar las diferentes bandejas y están ubicadas en las aristas laterales del satélite.

Desde el punto de vista del modelo de elementos finitos, la bandeja se ha representado como ya se ha descrito en la primera fase del trabajo mientras que el resto de elementos se van a describir a continuación. Los propiedades de los elementos 2D de los paneles de cierre es de tipo shell de material EN-AW-6061-T6 y de espesor 0.5 mm. Las vigas en L se han modelado con una propiedad 1D CBEAM con el mismo material que los paneles de cierre y con la sección mencionada que tiene las dimensiones que se pueden ver en esta figura.

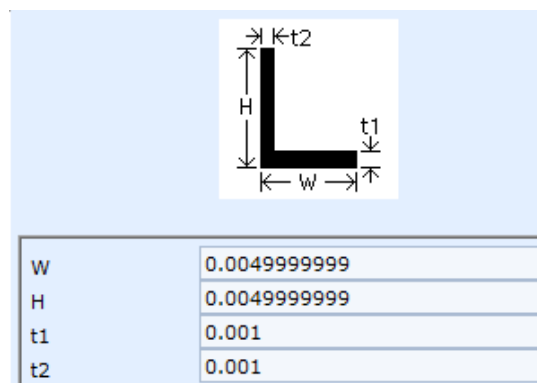


Figura 30: Dimensiones en m de la sección de las vigas en L del microsatélite

Se han tenido que definir cuatro propiedades diferentes para cada una de las aristas laterales del satélite. El motivo de esto es que para cada una de estas aristas hay que definir unos offsets diferentes para garantizar la correcta orientación de la sección de la viga.

Los equipos se han representado por masas puntuales colocadas a 80 mm de las bandejas excepto de la superior y unidas a estas por MPC tipo RBE2. Finalmente, los elementos encargados de representar los tornillos de la interfaz microsatélite-lanzador se han modelizado con la propiedad 1D CBUSH con las siguientes constantes de rigidez axial y de torsión.

[Spring Constant 1]	1E+09
[Spring constant 2]	1E+09
[Spring Constant 3]	1E+09
[Spring Constant 4]	100.
[Spring Constant 5]	10000000.
[Spring Constant 6]	10000000.

Figura 31: Constantes de rigidez axial y a torsión de la propiedad CBUSH

La ubicación de estos elementos de unión en la bandeja inferior A se puede ver en la siguiente imagen representados por la ausencia de elementos en los alrededores.

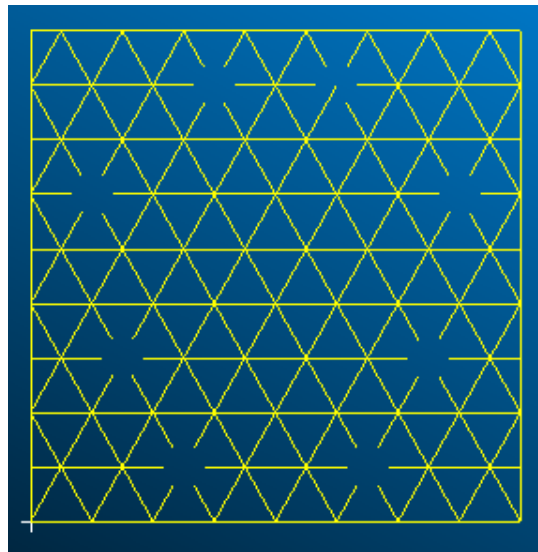


Figura 32: Ubicación de los elementos CBUSH en la bandeja inferior A

Para acabar la descripción del modelo FEM del microsatélite se recogen en la siguiente tabla el número de elementos por componentes y el número de nodos totales.

Tabla 9: Cantidad de elementos por tipos del modelo FEM del microsatélite completo

Panels(QUAD4)	Vigas(BAR2)	Equipos(COM2)	Uniones(CBUSH)	Bandejas	Total
1928	84	3	8	8356	10366

Tabla 10: Cantidad de nodos del modelo FEM del microsatélite completo

Nodos Totales
4577

Este diseño es fruto de un proceso iterativo para determinar las dimensiones de las vigas en L y el espesor de los paneles de cierre que hacen que el satélite en su conjunto tenga una primera frecuencia propia longitudinal superior a 90 Hz y una lateral superior a 45 Hz, como se podrá comprobar en los análisis que se detallarán en los siguientes apartados.

3.2. Resultados de los análisis

3.2.1. Chequeos

Como paso previo a la realización de los diversos análisis para los respectivos casos de carga, se van a llevar a cabo una serie de chequeos para comprobar que el modelo no presenta fallos desde el punto de vista de la construcción del FEM. Estos chequeos son el de carga gravitatoria, el de frecuencias propias como sólido rígido y el de energía de deformación. Para realizar estos chequeos se han utilizado los cabeceros proporcionados en la asignatura. Estos cabeceros junto a todos los demás usados en resto de análisis se pueden encontrar adjuntos aparte a este informe. En el chequeo de carga gravitatoria se comprueba que al aplicar una carga gravitatoria de 1g en cada uno de los ejes por separado aparece una reacción en cada componente de sentido negativo y con módulo el valor de la masa del satélite. En la siguiente imagen se muestran estos valores que aparecen en el fichero f06.

SUBCASE/ DAREA ID		LOAD TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3
	1	FX	-4.123687E+01	----	----	----	8.247373E-01	1.255571E+01
		FY	----	-4.123687E+01	----	-8.247373E-01	----	-1.255576E+01
		FZ	----	----	-4.123687E+01	-1.986996E+00	2.232323E+00	----
		MX	----	----	----	2.138058E+00	----	----
		MY	----	----	----	----	-2.383385E+00	----
		MZ	----	----	----	----	----	5.270812E-05
		TOTALS	-4.123687E+01	-4.123687E+01	-4.123687E+01	-6.736747E-01	6.736747E-01	7.154544E-09
1G GRAVITY LOAD CHECK								
MAY 24, 2019 MSC Nastran								

Figura 33: Chequeo de carga gravitatoria

En el caso del chequeo de frecuencias propias como sólido rígido hay que asegurarse de que las seis primeras frecuencias propias del microsatélite cuando no se encuentra anclado a nada tienen valor nulo o muy cercano a 0. En la siguiente imagen se puede ver esta comprobación.

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	EIGENVALUE	REAL EIGENVALUES		GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
			RADIANS	CYCLES		
1	1	-8.342007E-07	9.133459E-04	1.453635E-04	1.000000E+00	-8.342007E-07
2	2	-1.786523E-07	4.226728E-04	6.727046E-05	1.000000E+00	-1.786523E-07
3	3	-5.731385E-08	2.394031E-04	3.810219E-05	1.000000E+00	-5.731385E-08
4	4	1.638364E-08	1.279986E-04	2.037161E-05	1.000000E+00	1.638364E-08
5	5	8.435461E-08	2.904387E-04	4.622475E-05	1.000000E+00	8.435461E-08
6	6	2.245778E-07	4.738964E-04	7.542295E-05	1.000000E+00	2.245778E-07
7	7	1.905805E+05	4.365553E+02	6.947993E+01	1.000000E+00	1.905805E+05
1	RIGID BODY FREQUENCY CHECK					

Figura 34: Chequeo de frecuencias propias como sólido rígido

Por último, se ha comprobado que la energía de deformación cuando no se aplica ninguna carga y solo existe un punto de anclaje de la estructura se encuentra por debajo de un valor umbral. En la siguientes imágenes se pueden ver las capturas de estos chequeos en el f06 correspondiente.

USER INFORMATION MESSAGE 7570 (GFWG1S)		
RESULTS OF RIGID BODY CHECKS OF MATRIX RGG		
PRINT RESULTS IN ALL SIX DIRECTIONS AGAINST		(G-SET) FOLLOW:
DIRECTION	STRAIN ENERGY	THE LIMIT OF
1	6.905047E-07	1.000000E-02
2	6.182891E-07	PASS/FAIL
3	1.403634E-06	PASS
4	3.837524E-07	PASS
5	4.406471E-07	PASS
6	1.302967E-07	PASS

Figura 35: Chequeo de energía de deformación 1

```

USER INFORMATION MESSAGE 7570 (GFWG1S)
RESULTS OF RIGID BODY CHECKS OF MATRIX KNN (N-SET) FOLLOW:
PRINT RESULTS IN ALL SIX DIRECTIONS AGAINST THE LIMIT OF 1.000000E-02
DIRECTION STRAIN ENERGY PASS/FAIL
-----
1 9.363739E-07 PASS
2 2.606612E-07 PASS
3 1.238790E-06 PASS
4 3.106016E-07 PASS
5 4.052684E-07 PASS
6 1.092682E-07 PASS

```

Figura 36: Chequeo de energía de deformación 2

```

USER INFORMATION MESSAGE 7570 (GFWG1S)
RESULTS OF RIGID BODY CHECKS OF MATRIX KFF (F-SET) FOLLOW:
PRINT RESULTS IN ALL SIX DIRECTIONS AGAINST THE LIMIT OF 1.000000E-02
DIRECTION STRAIN ENERGY PASS/FAIL
-----
1 9.363739E-07 PASS
2 2.606612E-07 PASS
3 1.238790E-06 PASS
4 3.106016E-07 PASS
5 4.052684E-07 PASS
6 1.092682E-07 PASS

```

Figura 37: Chequeo de energía de deformación 3

```

USER INFORMATION MESSAGE 7570 (GFWG1S)
RESULTS OF RIGID BODY CHECKS OF MATRIX KAA1 (A-SET) FOLLOW:
PRINT RESULTS IN ALL SIX DIRECTIONS AGAINST THE LIMIT OF 1.000000E-02
DIRECTION STRAIN ENERGY PASS/FAIL
-----
1 9.363739E-07 PASS
2 2.606612E-07 PASS
3 1.238790E-06 PASS
4 3.106016E-07 PASS
5 4.052684E-07 PASS
6 1.092682E-07 PASS

```

Figura 38: Chequeo de energía de deformación 4

Con todos los resultados de los tests positivos ya se está en disposición de comenzar toda la batería de análisis para verificar la estructura del microsatélite con la garantía de que el modelo está correctamente construido, al menos desde el punto de vista del método de elementos finitos.

3.2.2. Análisis de modos propios

A continuación se van a mostrar el comportamiento del primer modo propio tanto longitudinal como lateral, así como la frecuencia para la que suceden y teniendo en cuenta que tienen que ser superiores a 90 Hz y 45 Hz, respectivamente. En las siguientes figuras se puede ver la fenomenología del primer modo propio lateral que sucede a 65.07 Hz y del primer modo propio longitudinal que ocurre a 104.41 Hz, siendo esta última la 39ª frecuencia propia del satélite.

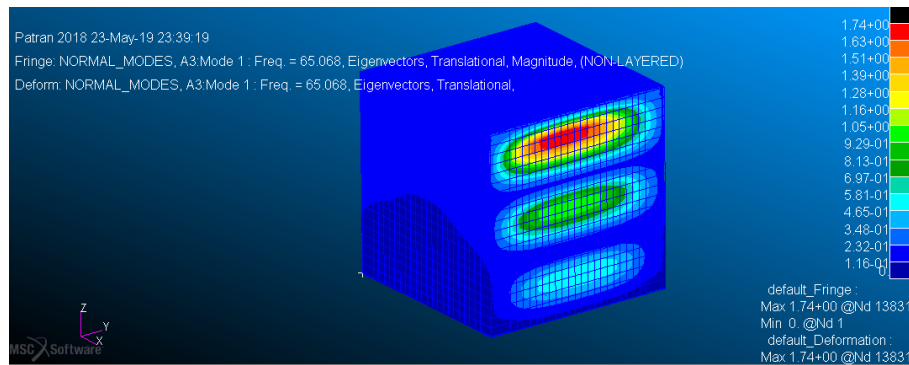


Figura 39: Comportamiento del primer modo propio lateral del satélite completo

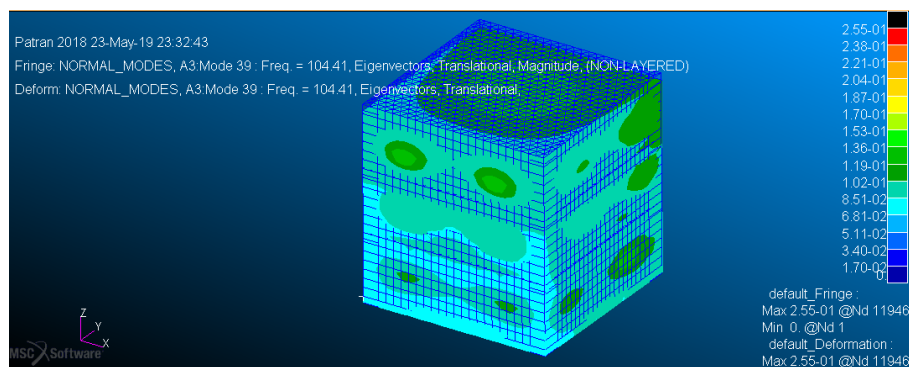


Figura 40: Comportamiento del primer modo propio longitudinal del satélite completo

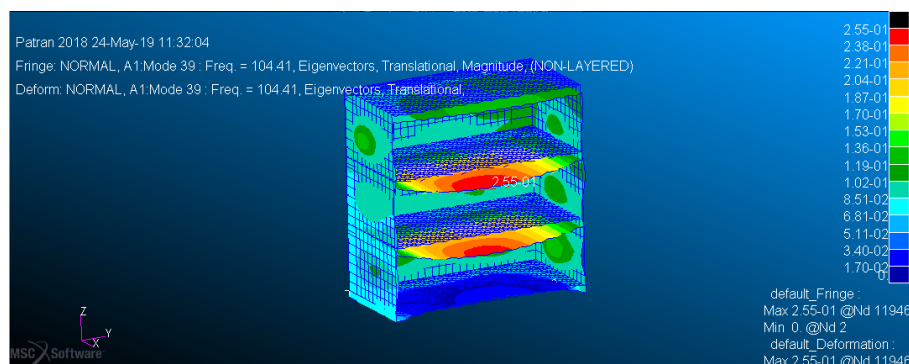


Figura 41: Detalle del comportamiento del primer modo propio longitudinal del satélite completo

Como se había anticipado, se ha podido comprobar que las frecuencias propias del satélite completo son superiores a los umbrales propuestos en el enunciado de este trabajo. Por lo tanto, el diseño se da por concluido habiendo fijado el modelo de bandeja optimizado y los parámetros de los demás elementos que forman la estructura del microsatélite objeto de estudio.

3.2.3. Análisis estáticos

En este apartado se van a mostrar los resultados de los análisis estáticos llevados a cabo al satélite para todos los casos de carga que se han definido en los tres ejes. En el caso del eje X, se ha aplicado una aceleración de 6g. En las siguientes imágenes se pueden ver los distintos resultados obtenidos para este caso de carga.

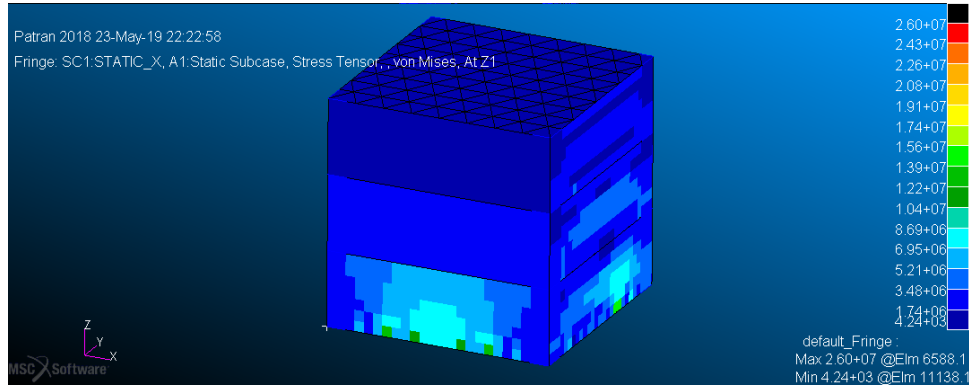


Figura 42: Esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en X

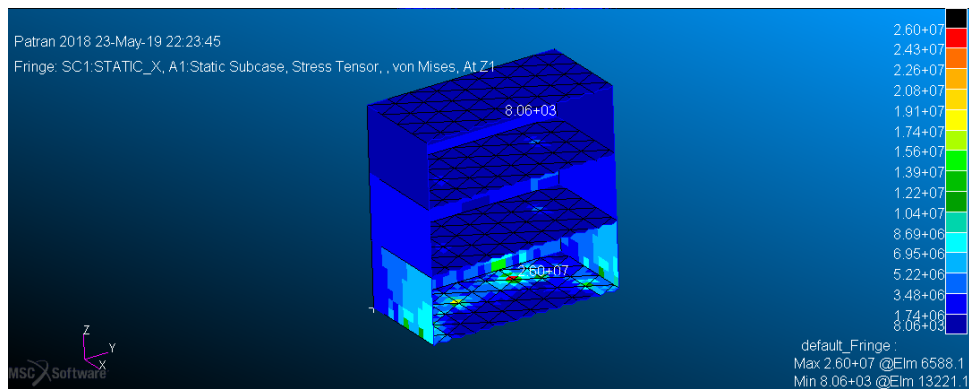


Figura 43: Detalle de los esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en X

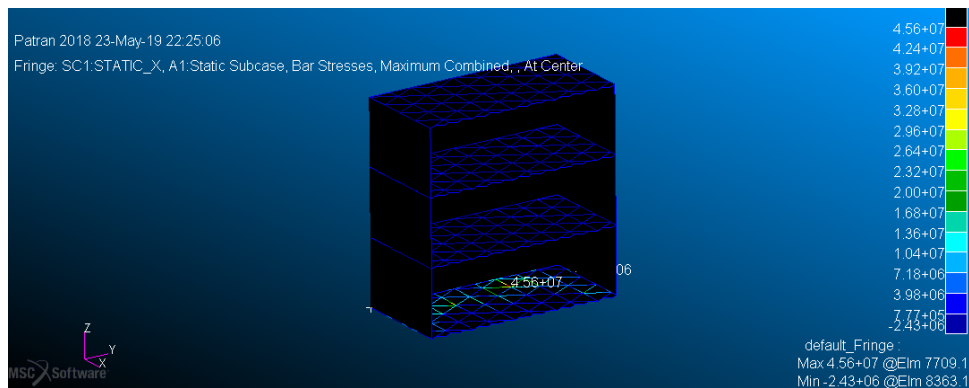


Figura 44: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en X

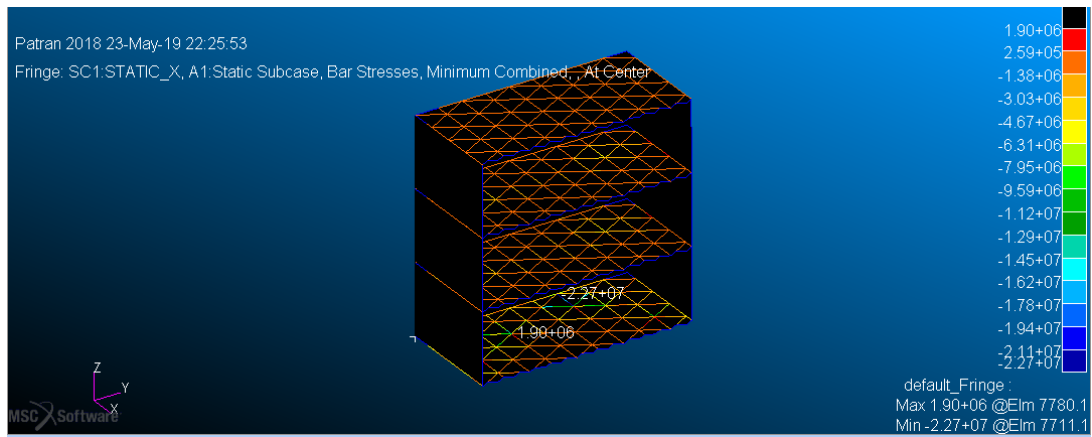


Figura 45: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en X

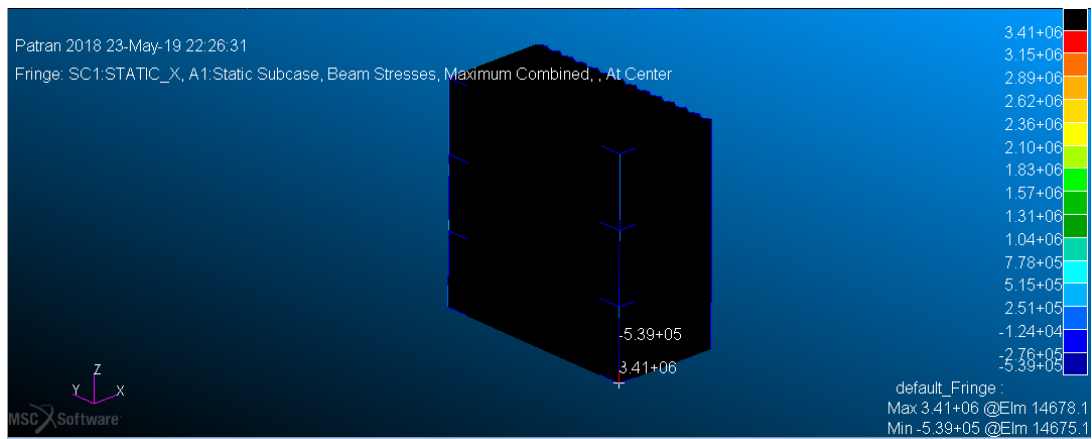


Figura 46: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en X

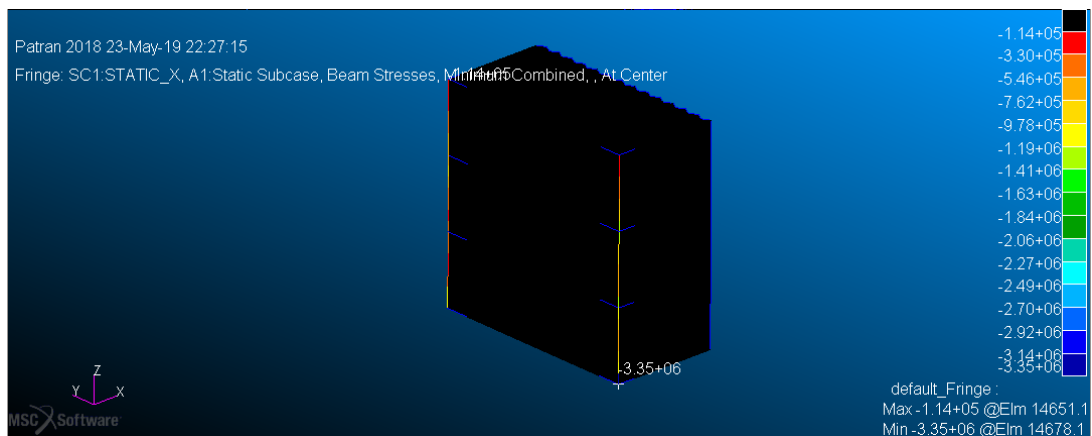


Figura 47: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en X

A continuación, se muestran las imágenes de los resultados del caso de carga estático de 6g en la dirección Y.

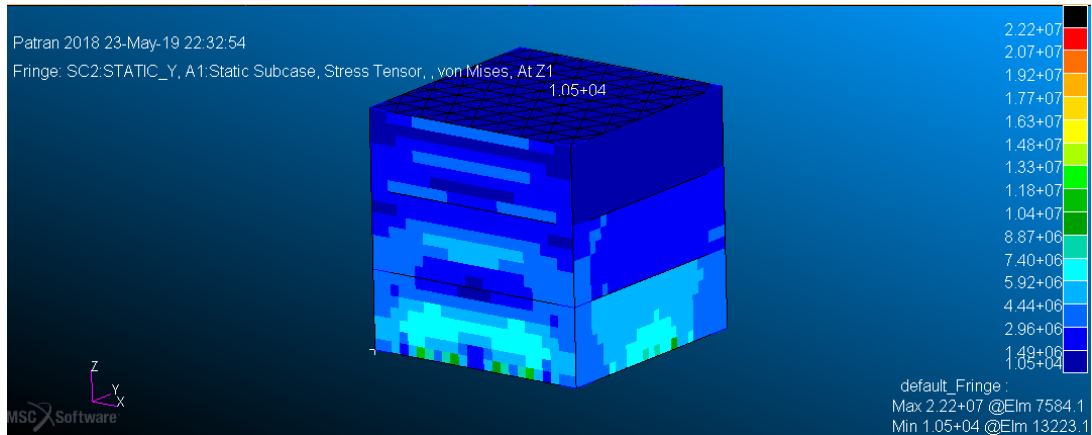


Figura 48: Esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Y

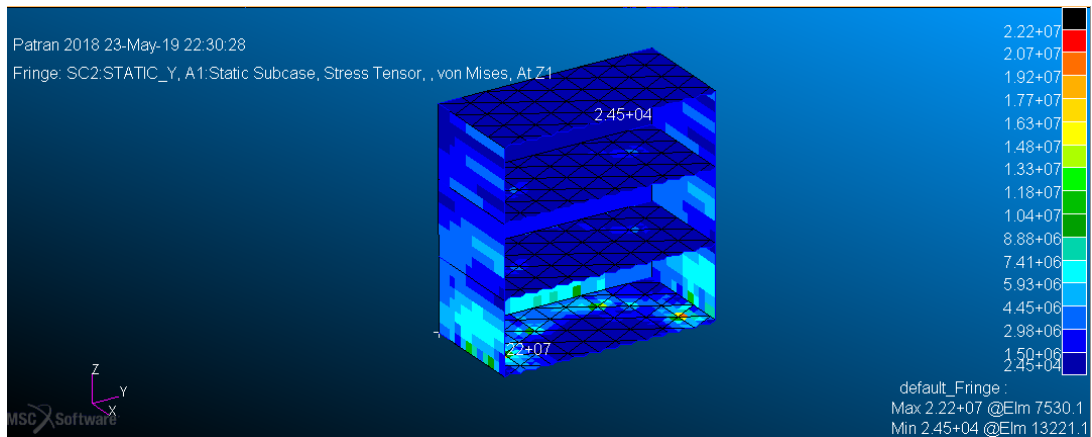


Figura 49: Detalle de los esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Y

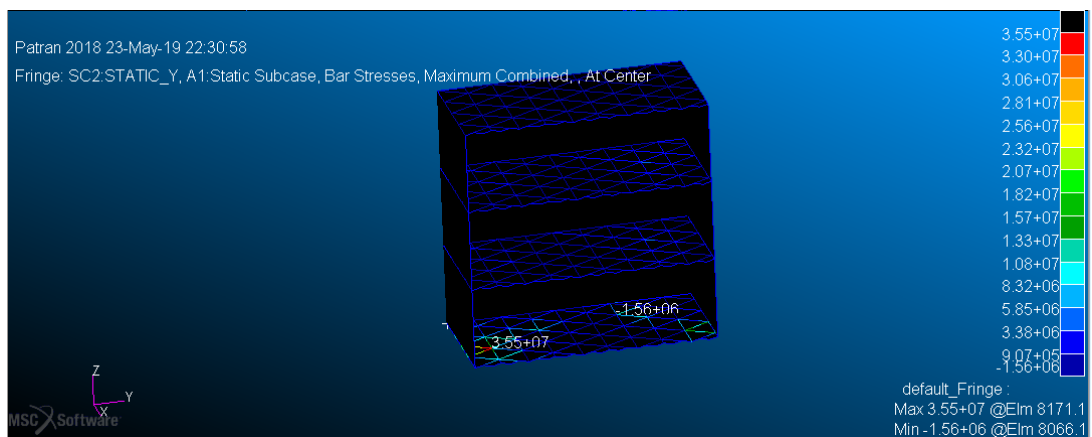


Figura 50: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Y

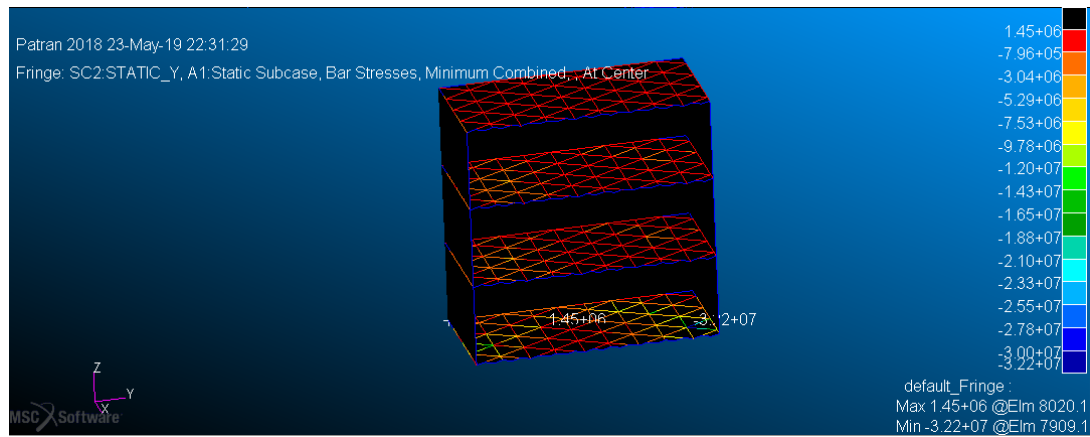


Figura 51: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Y

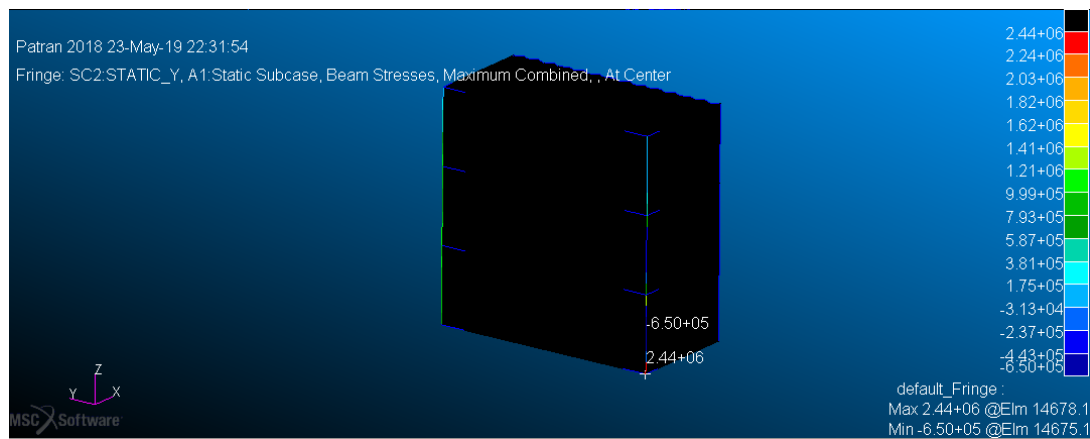


Figura 52: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en Y

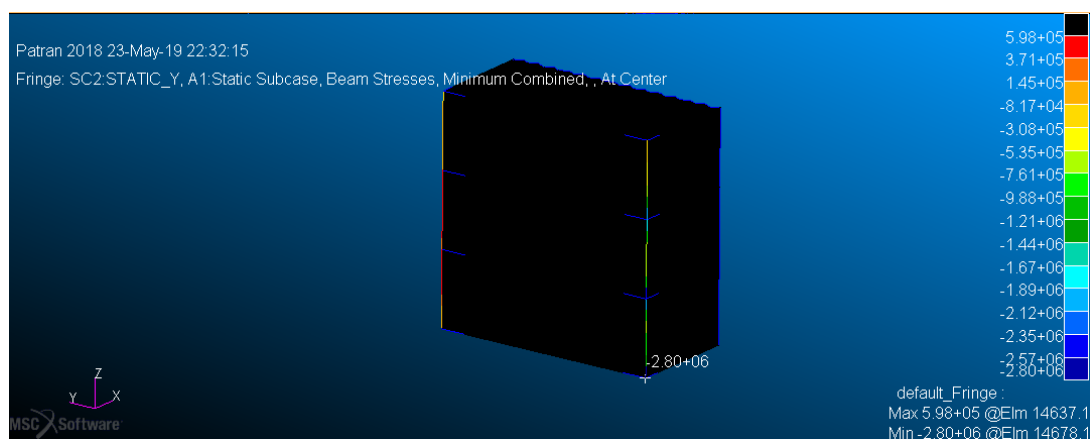


Figura 53: Esfuerzos del análisis estático en el caso de carga en Y

En las imágenes siguientes se muestran los resultados del caso de carga estático de 13g en la dirección Z.

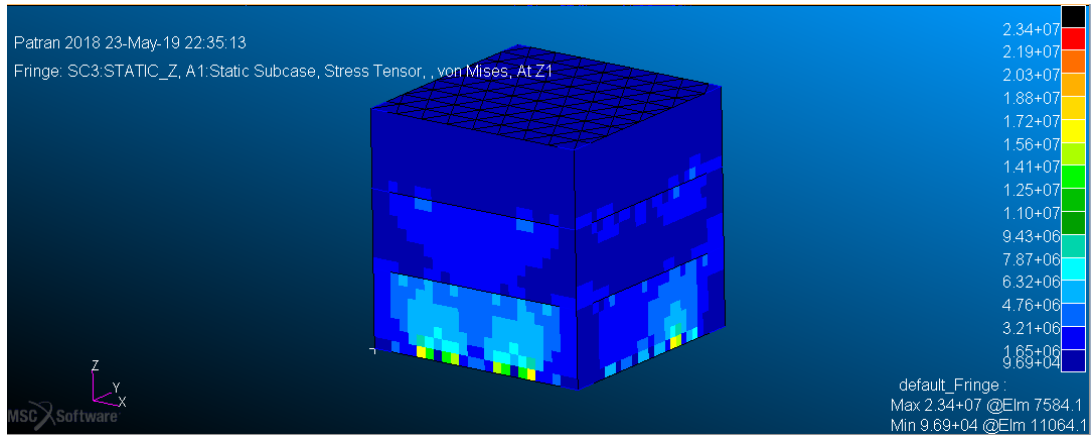


Figura 54: Esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Z

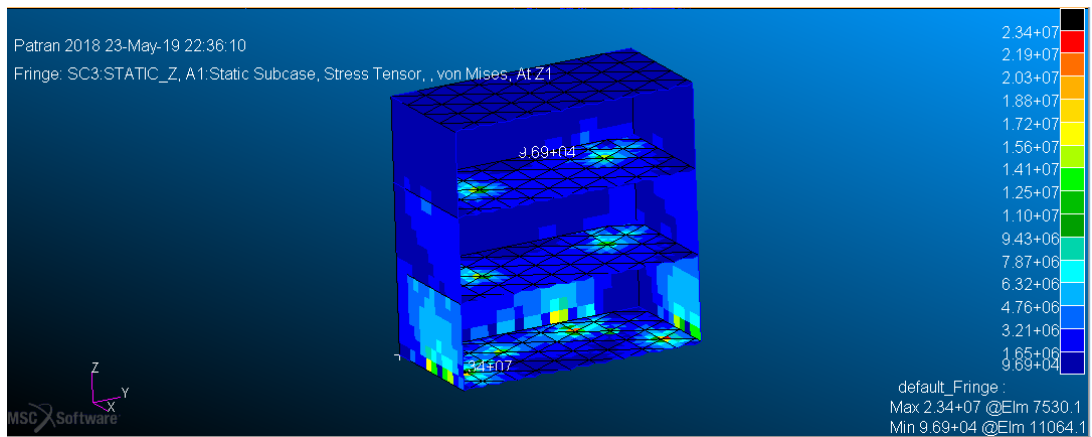


Figura 55: Detalle de los esfuerzos máximos en los elementos 2D del análisis estático en el caso de carga en Z

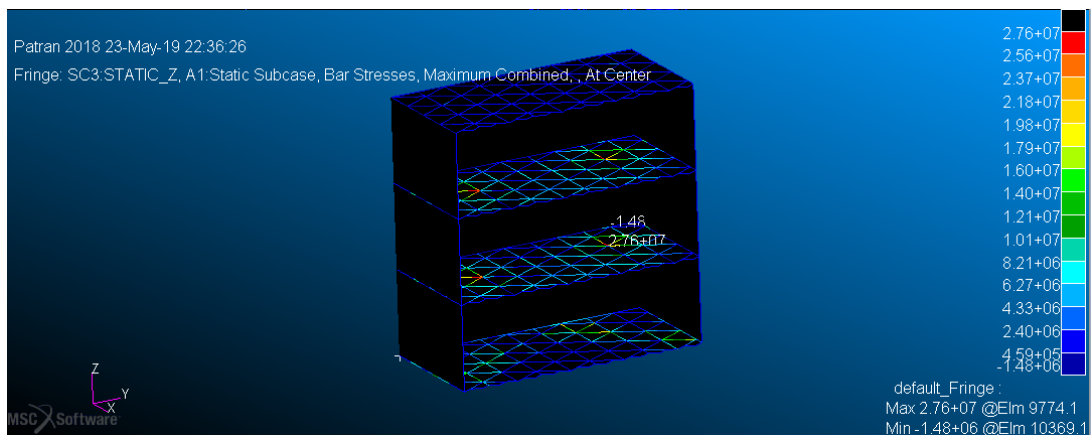


Figura 56: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Z

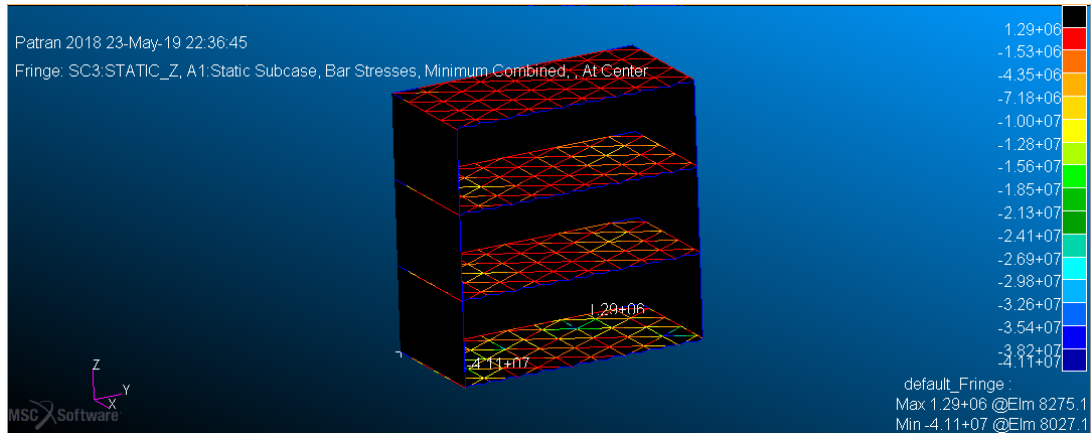


Figura 57: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D bar del análisis estático en el caso de carga en Z

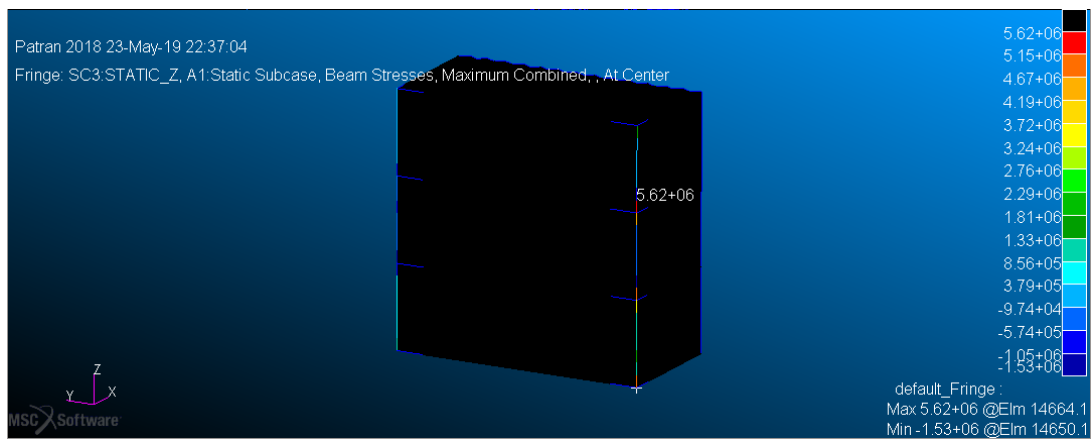


Figura 58: Esfuerzos máximos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en Z

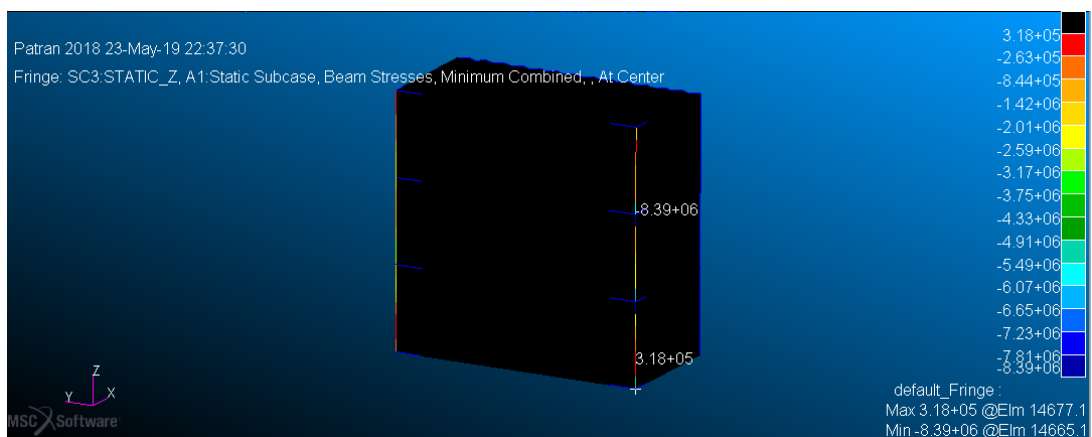


Figura 59: Esfuerzos mínimos combinados en los elementos 1D beam del análisis estático en el caso de carga en Z

Después de haber obtenido los diversos resultados de los análisis estáticos para los respectivos casos de carga en los tres ejes, se van a obtener los márgenes de seguridad asociados a estos valores de esfuerzos teniendo en cuenta las propiedades del material elegido que se han descrito con anterioridad. En las siguientes tablas se muestran recogidos estos márgenes de seguridad, desglosados en esfuerzos máximos de Von Mises 2D, máximo combinado 1D y mínimo combinado 1D, para cada uno de los casos de carga según los ejes, X, Y, Z.

Tabla 11: Márgenes de seguridad del análisis estático en el eje X del modelo FEM del microsatélite completo

	X		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	26.0	5.65	5.57
1D Max Combined	45.7	2.78	2.74
1D Min Combined	22.7	6.61	6.52

Tabla 12: Márgenes de seguridad del análisis estático en el eje Y del modelo FEM del microsatélite completo

	Y		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	22.1	6.82	6.73
1D Max Combined	35.5	3.87	3.81
1D Min Combined	32.3	4.35	.295

Tabla 13: Márgenes de seguridad del análisis estático en el eje Z del modelo FEM del microsatélite completo

	Z		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	23.3	6.42	6.33
1D Max Combined	27.6	5.26	5.19
1D Min Combined	41.1	3.20	3.16

Se ha comprobado que tanto en los esfuerzos máximos combinados como en los mínimos combinados para elementos 1D, el tipo más crítico es el correspondiente a los bar en todos los casos de carga.

3.2.4. Análisis de vibraciones sinusoidales

A continuación, se van a presentar los resultados de los diferentes análisis sinusoidales según los tres ejes y con las condiciones mostradas en la siguiente figura.

Eje	Rango de Frecuencia (Hz)	Aceleración
Longitudinal (Z)	4 - 6	25 mm
	6 - 100	3.75 g
Lateral (X, Y)	2 - 6	20 mm
	6 - 100	2.5 g

Figura 60: Condiciones de los diferentes análisis sinusoidales aplicados al satélite

El objetivo de los análisis sinusoidales consiste en conocer la respuesta del sistema en las frecuencias de resonancia lateral y longitudinal, para unos niveles de carga definidos en la figura anterior. Para ello se realiza un barrido en el rango de frecuencias desde los 4 Hz a los 100 Hz con las aceleraciones definidas previamente. En las siguientes imágenes se muestran las respuestas de la estructura del microsátélite a 2.5g para una frecuencia de 65 Hz, muy cercana a la primera frecuencia propia lateral del sistema.

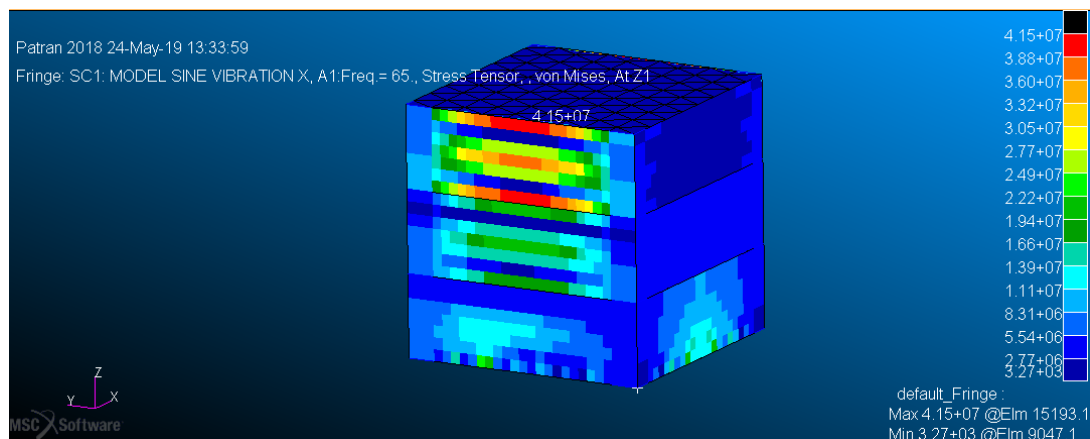


Figura 61: Esfuerzos de Von Mises del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g

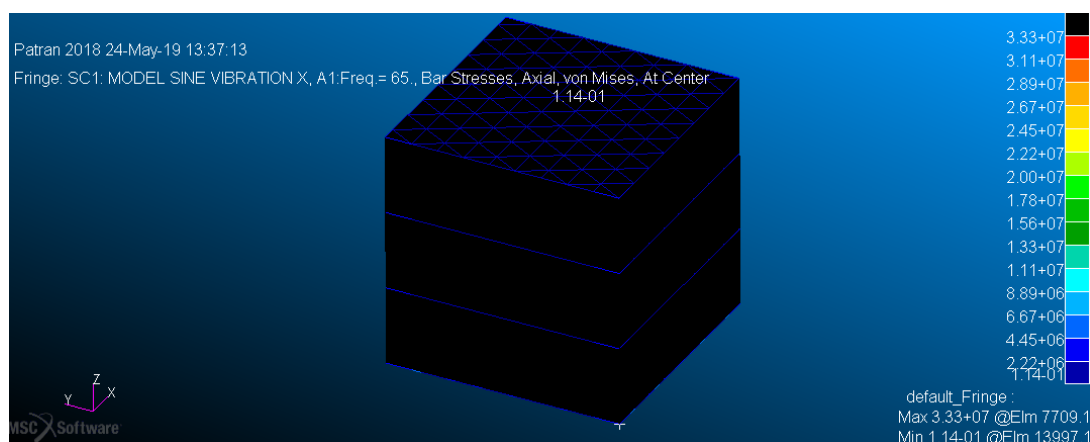


Figura 62: Esfuerzos axiales en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g

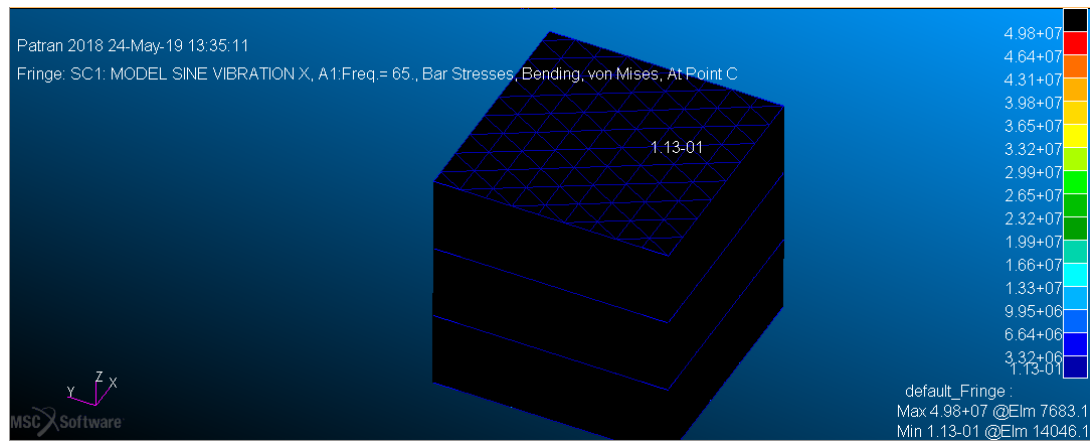


Figura 63: Esfuerzos flectores en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g

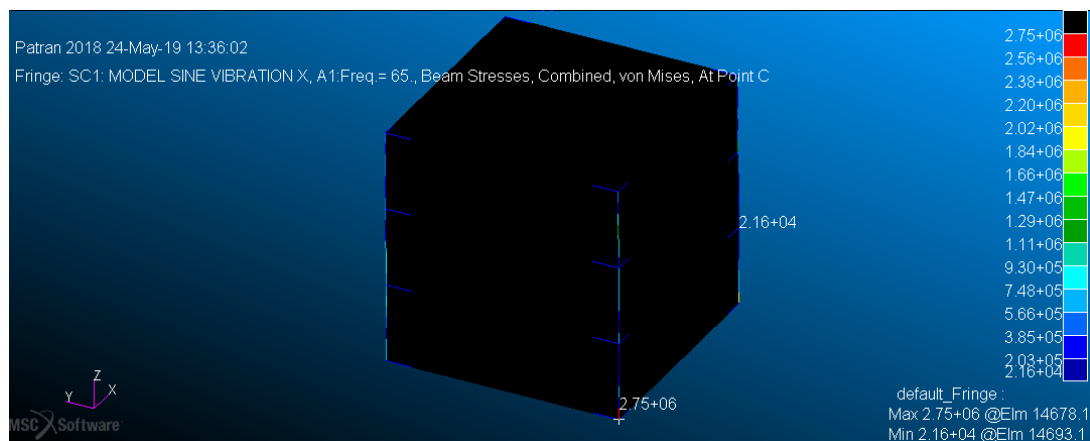


Figura 64: Esfuerzos combinados en los elementos beam del análisis sinusoidal en el caso de carga lateral a 65 Hz y a 2.5g

Este análisis se ha realizado según el eje X. Sin embargo, debido a la simetría que presenta el microsatélite según el eje Z, los resultados obtenidos en el análisis sinusoidal en eje Y, en concreto a la frecuencia de resonancia lateral, son iguales a los mostrados en las figuras anteriores.

Por otro lado, los resultados del análisis sinusoidal longitudinal a 100 Hz y con un nivel de carga de 3.75g son los mostrados a continuación en estas imágenes. Se ha elegido la frecuencia de 100 Hz porque el primer modo propio longitudinal ocurre a 104.41 Hz, valor por encima del límite superior del rango especificado para el análisis.

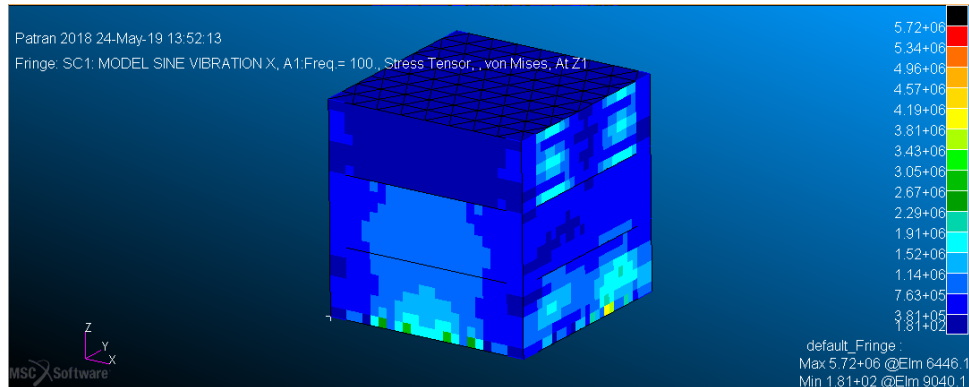


Figura 65: Esfuerzos de Von Mises del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g

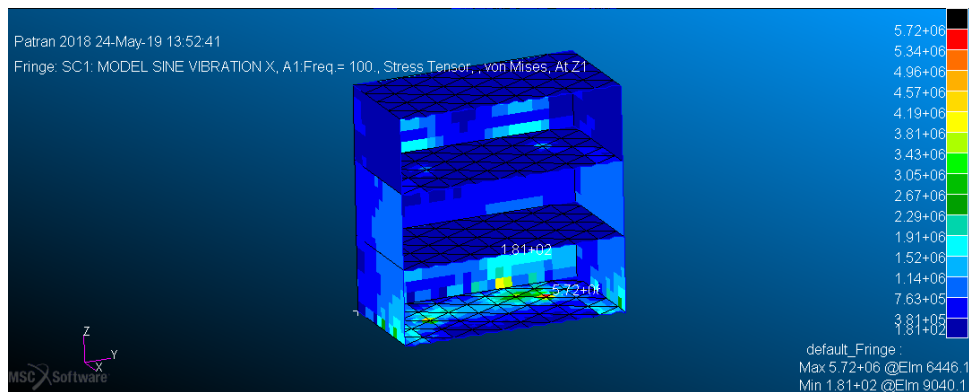


Figura 66: Detalle de los esfuerzos de Von Mises del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g

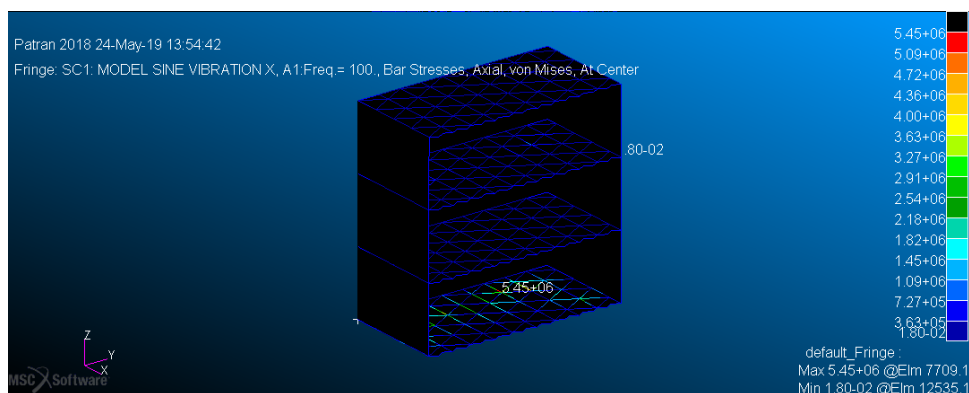


Figura 67: Esfuerzos axiales en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g

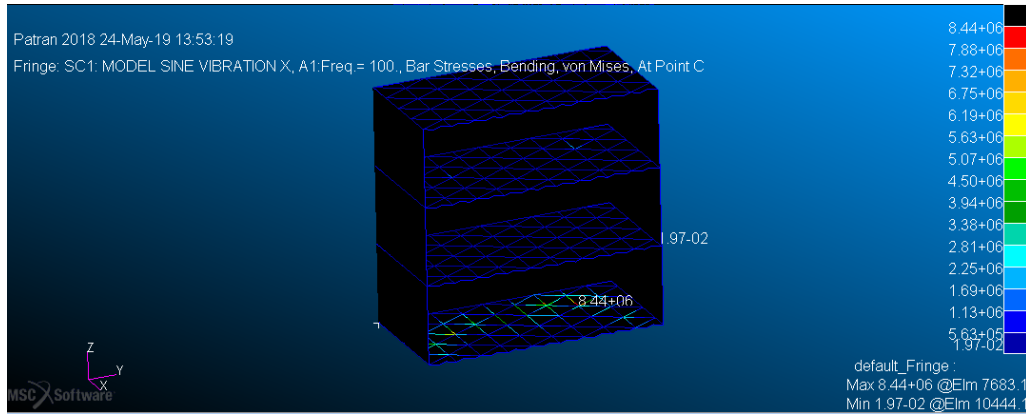


Figura 68: Esfuerzos flectores en los elementos bar del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g

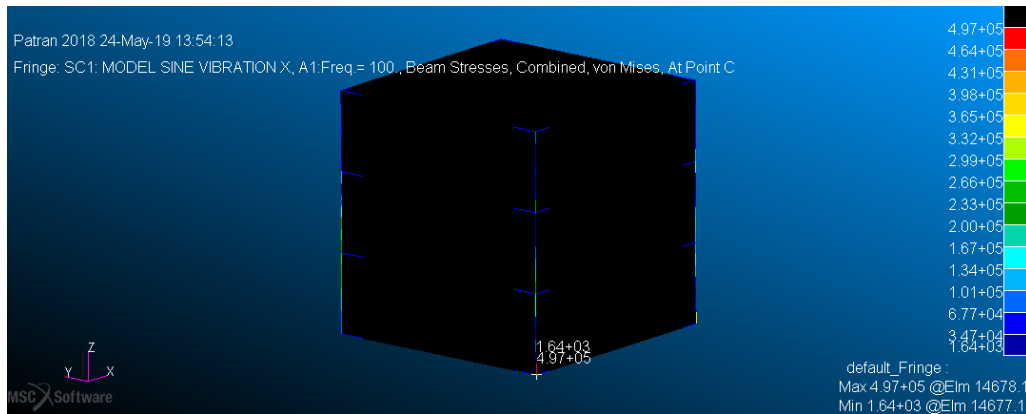


Figura 69: Esfuerzos combinados en los elementos beam del análisis sinusoidal en el caso de carga longitudinal a 100 Hz y a 3.75g

En las siguientes tablas se presentan los márgenes de seguridad obtenidos para las diferentes tensiones en los elementos 1D y 2D. Cabe destacar que solo se han tomado los esfuerzos flectores para el cálculo de los márgenes mencionados, prescindiendo de los axiales en los elementos 1D tipo bar, ya que estos son más restrictivos.

Tabla 14: Márgenes de seguridad del análisis sinusoidal del microsatélite en el eje X a 65 Hz y a 2.5g

	X		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	41.5	3.16	3.12
1D Bar Bending	49.8	2.47	2.43
1D Beam Combined	2.8	61.84	61.11

Tabla 15: Márgenes de seguridad del análisis sinusoidal del microsatélite en el eje Z a 100 Hz y a 3.75g

	Z		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	5.72	29.21	28.86
1D Bar Bending	8.44	19.47	19.24
1D Beam Combined	0.50	344.60	340.60

3.2.5. Análisis de vibraciones aleatorias

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos de los análisis de vibraciones aleatorias aplicados a la estructura del microsatélite en los tres ejes. La finalidad de realizar este análisis es la representación de la cargas que se encontrará el microsatélite de una forma estadísticamente parecida. Las condiciones de estos análisis se muestra en la siguiente figura.

Eje	Rango de Frecuencia (Hz)	Aceleración
Longitudinal (Z)	20 - 2000	0.0727 g ² /hz
Lateral (X, Y)	20 - 2000	0.0727 g ² /hz

Figura 70: Condiciones de los análisis de vibraciones aleatorias de la estructura del microsatélite

A continuación, se pueden ver los resultados del análisis de vibraciones aleatorias lateral, mostrándose los valores RMS en cada tipo de elemento.

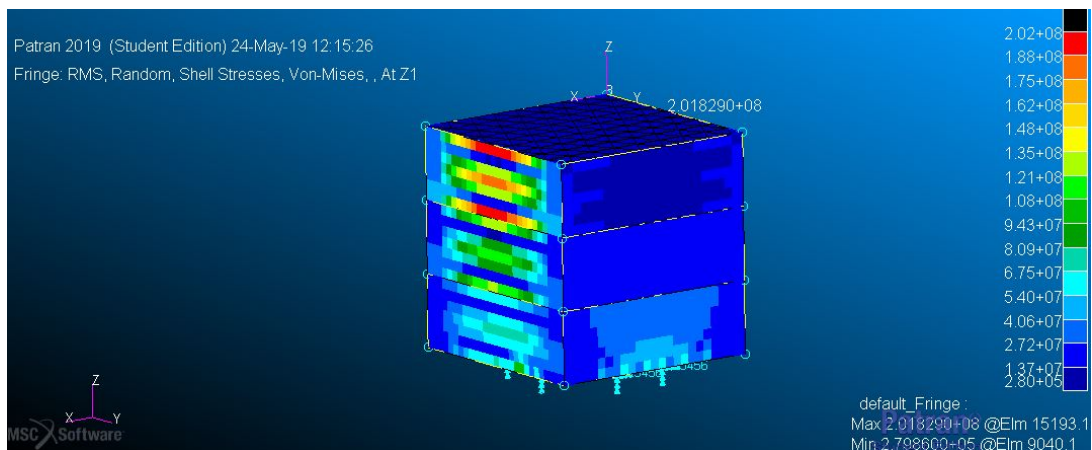


Figura 71: Esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en X a 0.0727 g²/Hz

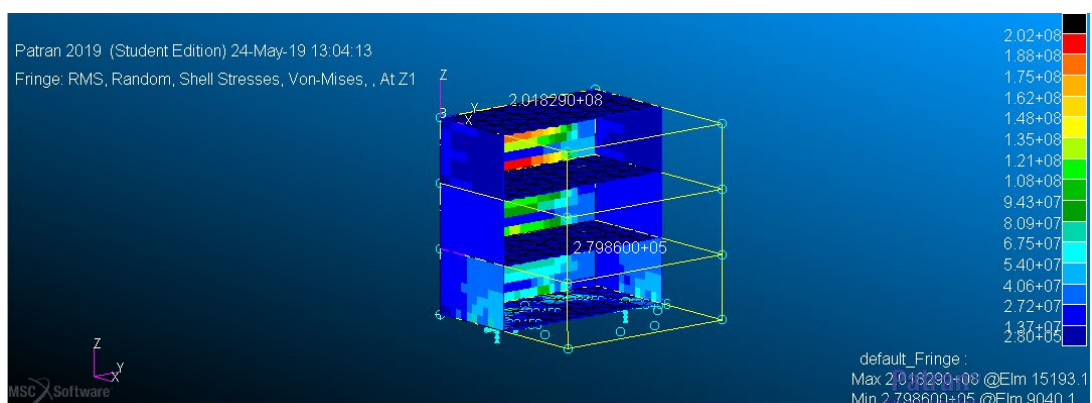


Figura 72: Detalle de los esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en X a 0.0727 g²/Hz

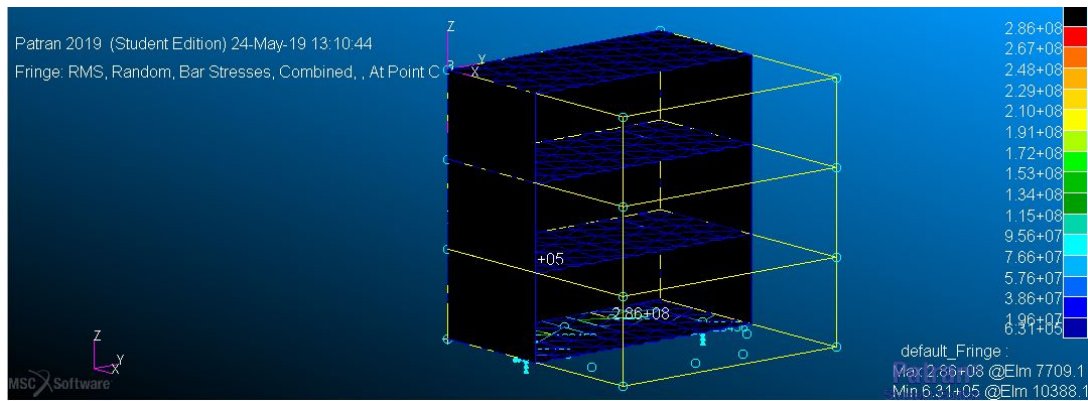


Figura 73: Esfuerzos combinados RMS en los elementos 1D beam en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en X a 0.0727 g²/Hz

En las figuras que se muestran a continuación se pueden los mismos resultados pero para el caso de carga lateral en Y.

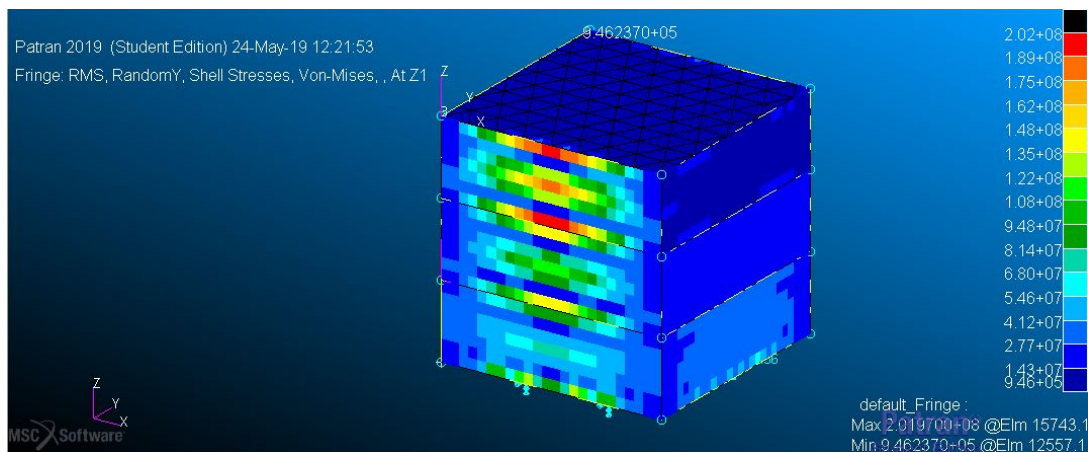


Figura 74: Esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en Y a 0.0727 g²/Hz

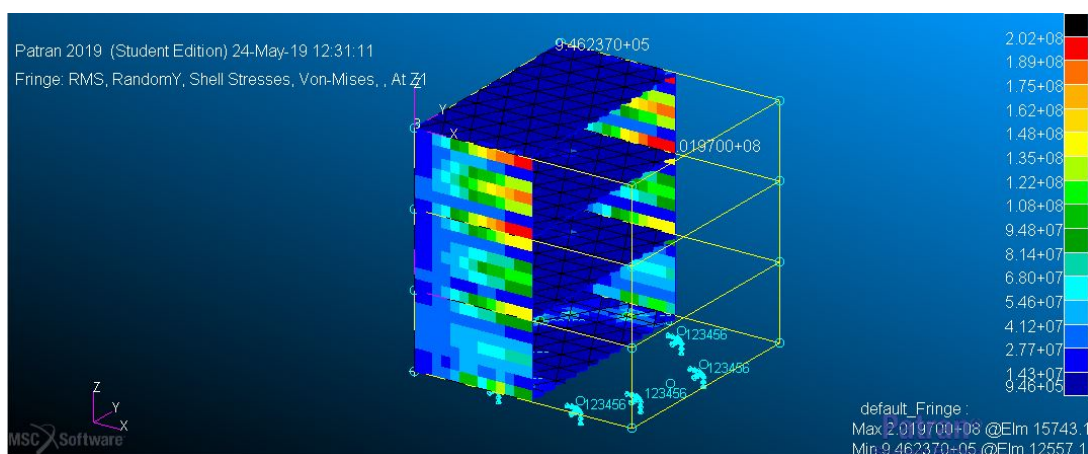


Figura 75: Detalle de los esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en Y a 0.0727 g²/Hz

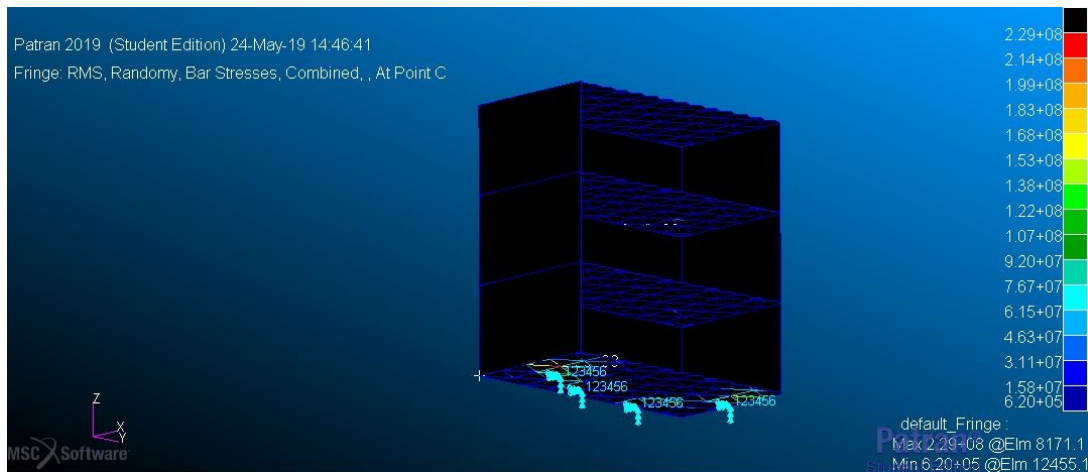


Figura 76: Esfuerzos combinados RMS en los elementos 1D beam en el análisis de vibraciones aleatorias lateral en Y a 0.0727 g²/Hz

Finalmente, se muestran los resultados de los análisis de vibraciones aleatorias para el caso de carga longitudinal.

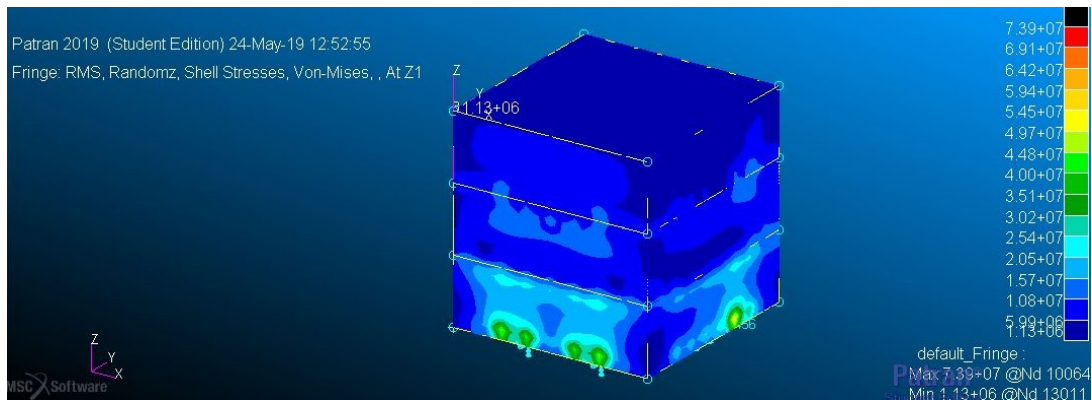


Figura 77: Esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal en Z a 0.0727 g²/Hz

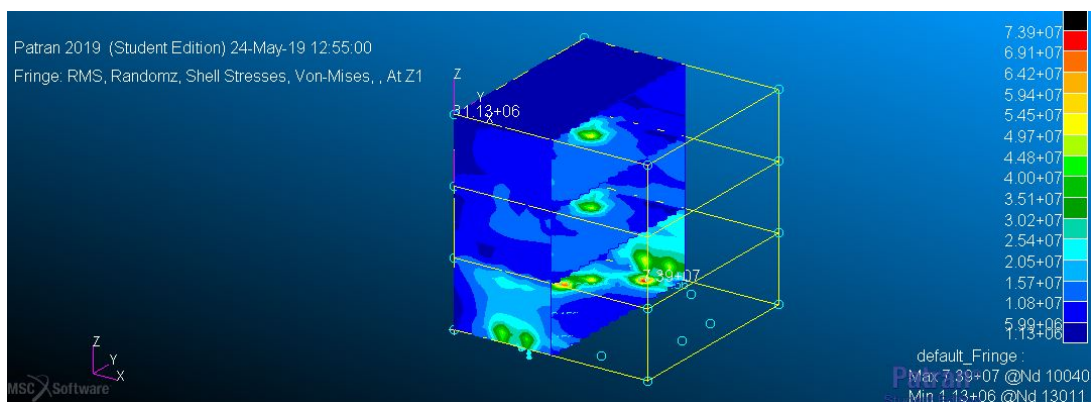


Figura 78: Detalle de los esfuerzos de Von Mises RMS en los elementos 2D en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal en Z a 0.0727 g²/Hz

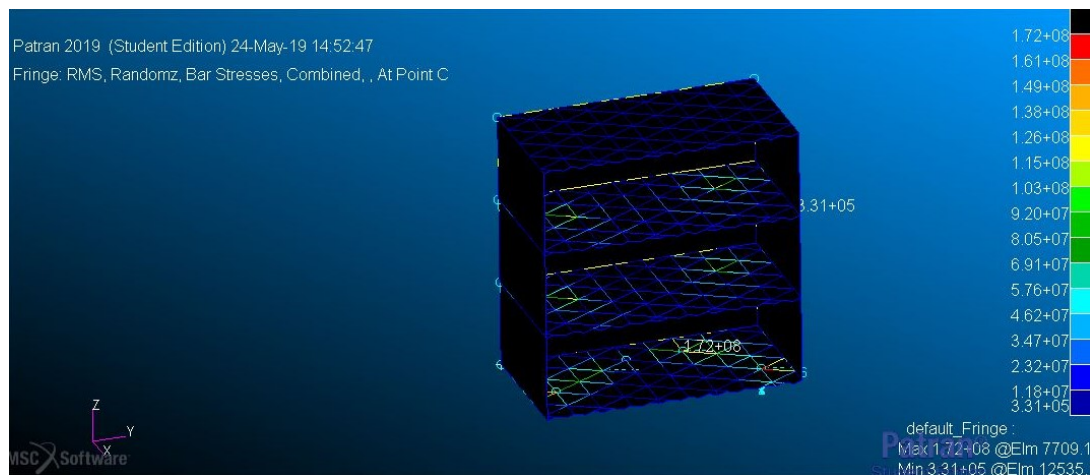


Figura 79: Esfuerzos combinados RMS en los elementos 1D beam en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal en Z a 0.0727 g²/Hz

En las siguientes tablas se muestran los márgenes de seguridad calculados para los valores de esfuerzos RMS obtenidos, y para los elementos 1D y 2D.

Tabla 16: Márgenes de seguridad del análisis random del microsatélite en el eje X a 0.0727g²/Hz

	X		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	202	-0.14	-0.15
1D Bar Combined	286	-0.39	-0.40

Tabla 17: Márgenes de seguridad del análisis random del microsatélite en el eje Y a 0.0727g²/Hz

	Y		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	202	-0.14	-0.15
1D Bar Combined	229	-0.24	-0.25

Tabla 18: Márgenes de seguridad del análisis random del microsatélite en el eje Z a 0.0727g²/Hz

	Z		
	VM [MPa]	MoSy	Mosu
2D Max Von Mises	73.9	1.33	1.31
1D Bar Combined	172	0	0

Se puede observar que para los análisis de vibraciones aleatorias se han obtenido algunos márgenes de seguridad negativos. Esto no es demasiado preocupante por dos motivos. El primero de ellos consiste en que estos valores negativos son bajos en valor absoluto por lo que los coeficientes correctores que se emplean para tener en cuenta las incertidumbres de la fase de diseño en el cálculo de márgenes pueden absorber esta pequeña desviación. El otro motivo es que el modelo resultante del proceso iterativo llevado a cabo en este trabajo se trata de una aproximación preliminar, por lo que en sucesivas fases del proyecto se procedería a corregir estos valores negativos.

3.2.6. Análisis de tornillos

Finalmente, se va a llevar a cabo el cálculo de los márgenes de seguridad de los tornillos, que en nuestro modelo vienen representados por elementos CBUSH cuyas características ya han sido comentadas en la descripción del modelo de elementos finitos del microsatélite completo. Por otro lado, las propiedades físicas de los tornillos se pueden ver en la siguiente figura.

Material	Acero A286	As (m²)	3.661E-5
Métrica	M8	Φn	0.038
σy (MPa)	950	sfy	1.0
σu (MPa)	1100	sfu = sfg	1.4
τy (MPa)	548	μs	0.2
τu (MPa)	655	Fv,max (N)	21972.1
Mapp (Nm)	33.5	Fv,min (N)	13241.4
FA	Resultado de fuerza axial de cada tornillo	FQ	Resultado de fuerza lateral de cada tornillo

Figura 80: Propiedades físicas de los tornillos empleados en la interfaz lanzador-microsatélite

Las expresiones usadas para el cálculo de los diferentes márgenes de seguridad son las que se muestran a continuación en la siguiente figura.

- Tensile total:

$$MoS_{tot,y} = \frac{A_s \sigma_y}{F_{v,max} + \Phi_n F_A s f_y} - 1$$

$$MoS_{tot,u} = \frac{A_s \sigma_u}{F_{v,max} + \Phi_n F_A s f_u} - 1$$

- Gapping:

$$MoS_g = \frac{F_{v,min}}{(1 - \Phi_n) F_A s f_g} - 1$$

- Sliding:

$$MoS_{slip} = \frac{(F_{v,min} - (1 - \Phi_n) F_A) \mu_s}{F_Q s f_{ult}} - 1$$

- Shear combined:

$$MoS_{comb,y} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_Q s f_y}{\tau_y A_s}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,max} + \Phi_n F_A s f_y}{A_s \sigma_y}\right)^2}} - 1$$

$$MoS_{comb,u} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_Q s f_u}{\tau_u A_s}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,max} + \Phi_n F_A s f_u}{A_s \sigma_u}\right)^2}} - 1$$

Figura 81: Propiedades físicas de los tornillos empleados en la interfaz lanzador-microsatélite

Con todas las variables conocidas se han calculado todos los márgenes de seguridad pedidos para cada tornillo, cada caso de carga y para cada eje de referencia. En las siguientes tablas se muestran los valores de estos márgenes de seguridad. Se puede observar que estos márgenes son iguales dos a dos debido a la simetría existente en la geometría del satélite respecto al plano yz.

Tabla 19: Márgenes de seguridad del tornillo 1

TORNILLO 1					
ESTÁTICO	X	Fa	2,37E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,32E-01
				<i>MoSg</i>	4,05E+01
		Fq	6,18E+02	<i>MoSslip</i>	2,01E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,28E-01
	Y	Fa	5,61E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,30E-01
				<i>MoSg</i>	1,65E+01
		Fq	1,78E+02	<i>MoSslip</i>	9,17E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,30E-01
SENO	X	Fa	3,78E+03	<i>MoStoty</i>	5,73E-01
				<i>MoStotu</i>	8,16E-01
				<i>MoSg</i>	1,60E+00
		Fq	1,22E+04	<i>MoSslip</i>	-8,88E-01
				<i>MoScomby</i>	1,36E-01
				<i>MoScombu</i>	1,10E-01
	Y	Fa	6,64E+03	<i>MoStoty</i>	5,65E-01
				<i>MoStotu</i>	8,04E-01
				<i>MoSg</i>	4,81E-01
		Fq	4,58E+03	<i>MoSslip</i>	-7,86E-01
				<i>MoScomby</i>	4,74E-01
				<i>MoScombu</i>	6,25E-01
	Z	Fa	5,70E+03	<i>MoStoty</i>	5,67E-01
				<i>MoStotu</i>	8,08E-01
				<i>MoSg</i>	7,24E-01
		Fq	1,14E+04	<i>MoSslip</i>	-9,03E-01
				<i>MoScomby</i>	1,69E-01
				<i>MoScombu</i>	1,53E-01
RANDOM	X	Fa	9,23E+02	<i>MoStoty</i>	5,80E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	9,65E+00
		Fq	2,06E+03	<i>MoSslip</i>	-1,44E-01
				<i>MoScomby</i>	5,60E-01
				<i>MoScombu</i>	7,86E-01
	Y	Fa	2,12E+03	<i>MoStoty</i>	5,77E-01
				<i>MoStotu</i>	8,23E-01
				<i>MoSg</i>	3,65E+00
		Fq	6,69E+02	<i>MoSslip</i>	1,39E+00
				<i>MoScomby</i>	5,75E-01
				<i>MoScombu</i>	8,19E-01
	Z	Fa	1,58E+03	<i>MoStoty</i>	5,79E-01
				<i>MoStotu</i>	8,26E-01
				<i>MoSg</i>	5,21E+00
		Fq	7,15E+02	<i>MoSslip</i>	-1,30E+00
				<i>MoScomby</i>	5,76E-01
				<i>MoScombu</i>	8,21E-01

Tabla 20: Márgenes de seguridad del tornillo 2

TORNILLO 2					
ESTÁTICO	X	Fa	2,37E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,32E-01
				<i>MoSg</i>	4,05E+01
		Fq	6,18E+02	<i>MoSslip</i>	2,01E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,28E-01
	Y	Fa	5,61E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,30E-01
				<i>MoSg</i>	1,65E+01
		Fq	1,78E+02	<i>MoSslip</i>	9,17E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,30E-01
SENO	X	Fa	3,78E+03	<i>MoStoty</i>	5,73E-01
				<i>MoStotu</i>	8,16E-01
				<i>MoSg</i>	1,60E+00
		Fq	1,22E+04	<i>MoSslip</i>	-8,88E-01
				<i>MoScomby</i>	1,36E-01
				<i>MoScombu</i>	1,10E-01
	Y	Fa	6,64E+03	<i>MoStoty</i>	5,65E-01
				<i>MoStotu</i>	8,04E-01
				<i>MoSg</i>	4,81E-01
		Fq	4,58E+03	<i>MoSslip</i>	-7,86E-01
				<i>MoScomby</i>	4,74E-01
				<i>MoScombu</i>	6,25E-01
RANDOM	X	Fa	9,23E+02	<i>MoStoty</i>	5,80E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	9,65E+00
		Fq	2,06E+03	<i>MoSslip</i>	-1,44E-01
				<i>MoScomby</i>	5,60E-01
				<i>MoScombu</i>	7,86E-01
	Y	Fa	2,12E+03	<i>MoStoty</i>	5,77E-01
				<i>MoStotu</i>	8,23E-01
				<i>MoSg</i>	3,65E+00
		Fq	6,69E+02	<i>MoSslip</i>	1,39E+00
				<i>MoScomby</i>	5,75E-01
				<i>MoScombu</i>	8,19E-01
RANDOM	Z	Fa	1,58E+03	<i>MoStoty</i>	5,79E-01
				<i>MoStotu</i>	8,26E-01
				<i>MoSg</i>	5,21E+00
		Fq	7,15E+02	<i>MoSslip</i>	-1,30E+00
				<i>MoScomby</i>	5,76E-01
				<i>MoScombu</i>	8,21E-01

Tabla 21: Márgenes de seguridad del tornillo 3

TORNILLO 3					
ESTÁTICO	X	Fa	8,00E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	1,13E+01
		Fq	9,81E+01	<i>MoSslip</i>	1,72E+01
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01
	Y	Fa	2,74E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,32E-01
				<i>MoSg</i>	3,49E+01
		Fq	6,86E+02	<i>MoSslip</i>	1,70E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,27E-01
	Z	Fa	8,66E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	1,04E+01
		Fq	1,97E+02	<i>MoSslip</i>	8,01E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01
SENO	X	Fa	1,20E+04	<i>MoStoty</i>	5,51E-01
				<i>MoStotu</i>	7,81E-01
				<i>MoSg</i>	-1,82E-01
		Fq	6,47E+03	<i>MoSslip</i>	-9,63E-01
				<i>MoScomby</i>	3,87E-01
				<i>MoScombu</i>	4,78E-01
	Y	Fa	2,83E+03	<i>MoStoty</i>	5,75E-01
				<i>MoStotu</i>	8,20E-01
				<i>MoSg</i>	2,47E+00
		Fq	8,14E+03	<i>MoSslip</i>	-8,15E-01
				<i>MoScomby</i>	3,27E-01
				<i>MoScombu</i>	3,77E-01
	Z	Fa	5,80E+03	<i>MoStoty</i>	5,67E-01
				<i>MoStotu</i>	8,07E-01
				<i>MoSg</i>	6,94E-01
		Fq	1,11E+04	<i>MoSslip</i>	-9,01E-01
				<i>MoScomby</i>	1,85E-01
				<i>MoScombu</i>	1,75E-01
RANDOM	X	Fa	9,23E+02	<i>MoStoty</i>	5,74E-01
				<i>MoStotu</i>	8,19E-01
				<i>MoSg</i>	2,09E+00
		Fq	2,06E+03	<i>MoSslip</i>	1,86E+00
				<i>MoScomby</i>	5,73E-01
				<i>MoScombu</i>	8,16E-01
	Y	Fa	2,12E+03	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	1,07E+01
		Fq	6,69E+02	<i>MoSslip</i>	-1,45E-01
				<i>MoScomby</i>	5,60E-01
				<i>MoScombu</i>	7,86E-01
	Z	Fa	1,58E+03	<i>MoStoty</i>	5,79E-01
				<i>MoStotu</i>	8,26E-01
				<i>MoSg</i>	5,26E+00
		Fq	7,15E+02	<i>MoSslip</i>	-1,35E+00
				<i>MoScomby</i>	5,77E-01
				<i>MoScombu</i>	8,22E-01

Tabla 22: Márgenes de seguridad del tornillo 4

TORNILLO 4					
ESTÁTICO	X	Fa	4,30E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	2,19E+01
		Fq	5,80E+02	<i>MoSslip</i>	2,16E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,27E-01
	Y	Fa	7,02E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,30E-01
				<i>MoSg</i>	1,30E+01
		Fq	2,04E+02	<i>MoSslip</i>	7,80E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01
SENO	X	Fa	8,95E+02	<i>MoStoty</i>	5,80E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	9,99E+00
		Fq	2,94E+02	<i>MoSslip</i>	5,02E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,28E-01
	Y	Fa	8,97E+03	<i>MoStoty</i>	5,66E-01
				<i>MoStotu</i>	8,06E-01
				<i>MoSg</i>	5,76E-01
		Fq	9,74E+03	<i>MoSslip</i>	-8,94E-01
				<i>MoScomby</i>	2,47E-01
				<i>MoScombu</i>	2,60E-01
RANDOM	X	Fa	6,24E+03	<i>MoStoty</i>	5,59E-01
				<i>MoStotu</i>	7,94E-01
				<i>MoSg</i>	9,55E-02
		Fq	5,03E+03	<i>MoSslip</i>	-8,69E-01
				<i>MoScomby</i>	4,52E-01
				<i>MoScombu</i>	1,52E+00
	Y	Fa	6,20E+03	<i>MoStoty</i>	5,66E-01
				<i>MoStotu</i>	8,06E-01
				<i>MoSg</i>	5,86E-01
		Fq	1,12E+04	<i>MoSslip</i>	-9,07E-01
				<i>MoScomby</i>	1,78E-01
				<i>MoScombu</i>	1,66E-01
RANDOM	X	Fa	1,67E+03	<i>MoStoty</i>	5,78E-01
				<i>MoStotu</i>	8,25E-01
				<i>MoSg</i>	4,88E+00
		Fq	1,84E+03	<i>MoSslip</i>	-9,73E-02
				<i>MoScomby</i>	5,62E-01
				<i>MoScombu</i>	7,91E-01
	Y	Fa	2,77E+03	<i>MoStoty</i>	5,75E-01
				<i>MoStotu</i>	8,21E-01
				<i>MoSg</i>	2,55E+00
		Fq	8,29E+02	<i>MoSslip</i>	8,24E-01
				<i>MoScomby</i>	5,72E-01
				<i>MoScombu</i>	8,14E-01
RANDOM	Z	Fa	1,48E+03	<i>MoStoty</i>	5,79E-01
				<i>MoStotu</i>	8,26E-01
				<i>MoSg</i>	5,65E+00
		Fq	7,19E+02	<i>MoSslip</i>	-1,28E+00
				<i>MoScomby</i>	5,76E-01
				<i>MoScombu</i>	8,21E-01

Tabla 23: Márgenes de seguridad del tornillo 5

TORNILLO 5					
ESTÁTICO	X	Fa	4,30E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	2,19E+01
		Fq	5,80E+02	<i>MoSslip</i>	2,16E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,27E-01
	Y	Fa	7,02E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,30E-01
				<i>MoSg</i>	1,30E+01
		Fq	2,04E+02	<i>MoSslip</i>	7,80E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01
SENO	X	Fa	6,24E+03	<i>MoStoty</i>	5,66E-01
				<i>MoStotu</i>	8,06E-01
				<i>MoSg</i>	5,76E-01
		Fq	9,74E+03	<i>MoSslip</i>	-8,94E-01
				<i>MoScomby</i>	2,47E-01
				<i>MoScombu</i>	2,60E-01
	Y	Fa	8,97E+03	<i>MoStoty</i>	5,59E-01
				<i>MoStotu</i>	7,94E-01
				<i>MoSg</i>	9,55E-02
		Fq	5,03E+03	<i>MoSslip</i>	-8,69E-01
				<i>MoScomby</i>	4,52E-01
				<i>MoScombu</i>	1,52E+00
	Z	Fa	6,20E+03	<i>MoStoty</i>	5,66E-01
				<i>MoStotu</i>	8,06E-01
				<i>MoSg</i>	5,86E-01
		Fq	1,12E+04	<i>MoSslip</i>	-9,07E-01
				<i>MoScomby</i>	1,78E-01
				<i>MoScombu</i>	1,66E-01
RANDOM	X	Fa	1,67E+03	<i>MoStoty</i>	5,78E-01
				<i>MoStotu</i>	8,25E-01
				<i>MoSg</i>	4,88E+00
		Fq	1,84E+03	<i>MoSslip</i>	-9,73E-02
				<i>MoScomby</i>	5,62E-01
				<i>MoScombu</i>	7,91E-01
	Y	Fa	2,77E+03	<i>MoStoty</i>	5,75E-01
				<i>MoStotu</i>	8,21E-01
				<i>MoSg</i>	2,55E+00
		Fq	8,29E+02	<i>MoSslip</i>	8,24E-01
				<i>MoScomby</i>	5,72E-01
				<i>MoScombu</i>	8,14E-01
	Z	Fa	1,48E+03	<i>MoStoty</i>	5,79E-01
				<i>MoStotu</i>	8,26E-01
				<i>MoSg</i>	5,65E+00
		Fq	7,19E+02	<i>MoSslip</i>	-1,28E+00
				<i>MoScomby</i>	5,76E-01
				<i>MoScombu</i>	8,21E-01

Tabla 24: Márgenes de seguridad del tornillo 6

TORNILLO 6					
ESTÁTICO	X	Fa	8,00E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	1,13E+01
		Fq	9,81E+01	<i>MoSslip</i>	1,72E+01
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01
	Y	Fa	2,74E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,32E-01
				<i>MoSg</i>	3,49E+01
		Fq	6,86E+02	<i>MoSslip</i>	1,70E+00
				<i>MoScomby</i>	5,80E-01
				<i>MoScombu</i>	8,27E-01
SENO	X	Fa	1,20E+04	<i>MoStoty</i>	5,51E-01
				<i>MoStotu</i>	7,81E-01
				<i>MoSg</i>	-1,82E-01
		Fq	6,47E+03	<i>MoSslip</i>	-9,63E-01
				<i>MoScomby</i>	3,87E-01
				<i>MoScombu</i>	4,78E-01
	Y	Fa	2,83E+03	<i>MoStoty</i>	5,75E-01
				<i>MoStotu</i>	8,20E-01
				<i>MoSg</i>	2,47E+00
		Fq	8,14E+03	<i>MoSslip</i>	-8,15E-01
				<i>MoScomby</i>	3,27E-01
				<i>MoScombu</i>	3,77E-01
RANDOM	X	Fa	9,23E+02	<i>MoStoty</i>	5,74E-01
				<i>MoStotu</i>	8,19E-01
				<i>MoSg</i>	2,09E+00
		Fq	2,06E+03	<i>MoSslip</i>	1,86E+00
				<i>MoScomby</i>	5,73E-01
				<i>MoScombu</i>	8,16E-01
	Y	Fa	2,12E+03	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,29E-01
				<i>MoSg</i>	1,07E+01
		Fq	6,69E+02	<i>MoSslip</i>	-1,45E-01
				<i>MoScomby</i>	5,60E-01
				<i>MoScombu</i>	7,86E-01
RANDOM	Z	Fa	1,58E+03	<i>MoStoty</i>	5,79E-01
				<i>MoStotu</i>	8,26E-01
				<i>MoSg</i>	5,26E+00
		Fq	7,15E+02	<i>MoSslip</i>	-1,35E+00
				<i>MoScomby</i>	5,77E-01
				<i>MoScombu</i>	8,22E-01

Tabla 25: Márgenes de seguridad del tornillo 7

TORNILLO 7					
ESTÁTICO	X	Fa	4,37E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	2,15E+01
		Fq	1,37E+02	<i>MoSslip</i>	1,24E+01
				<i>MoScomby</i>	5,82E-01
				<i>MoScombu</i>	8,31E-01
	Y	Fa	1,33E+02	<i>MoStoty</i>	5,83E-01
				<i>MoStotu</i>	8,32E-01
				<i>MoSg</i>	7,32E+01
		Fq	6,11E+02	<i>MoSslip</i>	2,07E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,28E-01
SENO	X	Fa	6,23E+03	<i>MoStoty</i>	5,66E-01
				<i>MoStotu</i>	8,06E-01
				<i>MoSg</i>	5,78E-01
		Fq	3,01E+03	<i>MoSslip</i>	-6,56E-01
				<i>MoScomby</i>	5,25E-01
				<i>MoScombu</i>	7,21E-01
	Y	Fa	6,93E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,30E-01
				<i>MoSg</i>	1,32E+01
		Fq	1,04E+04	<i>MoSslip</i>	-8,26E-01
				<i>MoScomby</i>	2,25E-01
				<i>MoScombu</i>	2,27E-01
RANDOM	X	Fa	1,68E+03	<i>MoStoty</i>	5,80E-01
				<i>MoStotu</i>	8,28E-01
				<i>MoSg</i>	7,18E+00
		Fq	8,33E+03	<i>MoSslip</i>	-7,93E-01
				<i>MoScomby</i>	3,21E-01
				<i>MoScombu</i>	3,66E-01
	Y	Fa	4,18E+02	<i>MoStoty</i>	5,78E-01
				<i>MoStotu</i>	8,25E-01
				<i>MoSg</i>	4,84E+00
		Fq	5,22E+02	<i>MoSslip</i>	2,18E+00
				<i>MoScomby</i>	5,77E-01
				<i>MoScombu</i>	8,23E-01
RANDOM	Y	Fa	4,18E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	2,25E+01
		Fq	1,86E+03	<i>MoSslip</i>	-1,55E-02
				<i>MoScomby</i>	5,65E-01
				<i>MoScombu</i>	7,96E-01
	Z	Fa	4,88E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	1,92E+01
		Fq	4,41E+02	<i>MoSslip</i>	-1,15E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01

Tabla 26: Márgenes de seguridad del tornillo 8

TORNILLO 8					
ESTÁTICO	X	Fa	4,37E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	2,15E+01
		Fq	1,37E+02	<i>MoSslip</i>	1,24E+01
				<i>MoScomby</i>	5,82E-01
				<i>MoScombu</i>	8,31E-01
	Y	Fa	1,33E+02	<i>MoStoty</i>	5,83E-01
				<i>MoStotu</i>	8,32E-01
				<i>MoSg</i>	7,32E+01
		Fq	6,11E+02	<i>MoSslip</i>	2,07E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,28E-01
SENO	X	Fa	6,23E+03	<i>MoStoty</i>	5,66E-01
				<i>MoStotu</i>	8,06E-01
				<i>MoSg</i>	5,78E-01
		Fq	3,01E+03	<i>MoSslip</i>	-6,56E-01
				<i>MoScomby</i>	5,25E-01
				<i>MoScombu</i>	7,21E-01
	Y	Fa	6,93E+02	<i>MoStoty</i>	5,81E-01
				<i>MoStotu</i>	8,30E-01
				<i>MoSg</i>	1,32E+01
		Fq	1,04E+04	<i>MoSslip</i>	-8,26E-01
				<i>MoScomby</i>	2,25E-01
				<i>MoScombu</i>	2,27E-01
RANDOM	X	Fa	1,68E+03	<i>MoStoty</i>	5,80E-01
				<i>MoStotu</i>	8,28E-01
				<i>MoSg</i>	7,18E+00
		Fq	8,33E+03	<i>MoSslip</i>	-7,93E-01
				<i>MoScomby</i>	3,21E-01
				<i>MoScombu</i>	3,66E-01
	Y	Fa	4,18E+02	<i>MoStoty</i>	5,78E-01
				<i>MoStotu</i>	8,25E-01
				<i>MoSg</i>	4,84E+00
		Fq	5,22E+02	<i>MoSslip</i>	2,18E+00
				<i>MoScomby</i>	5,77E-01
				<i>MoScombu</i>	8,23E-01
RANDOM	Y	Fa	4,18E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	2,25E+01
		Fq	1,86E+03	<i>MoSslip</i>	-1,55E-02
				<i>MoScomby</i>	5,65E-01
				<i>MoScombu</i>	7,96E-01
	Z	Fa	4,88E+02	<i>MoStoty</i>	5,82E-01
				<i>MoStotu</i>	8,31E-01
				<i>MoSg</i>	1,92E+01
		Fq	4,41E+02	<i>MoSslip</i>	-1,15E+00
				<i>MoScomby</i>	5,81E-01
				<i>MoScombu</i>	8,29E-01

4. Conclusiones

La primera conclusión que se ha extraído es que a la hora de trabajar con un programa como Patran es fundamental ser muy metódico y meticuloso en todo el proceso de modelización. En primer lugar, para mantener un orden que no haga que el avance en el trabajo desarrollado sea excesivamente tedioso y en segundo lugar, para no cometer errores en el modelo como crear una malla aparentemente unida pero que en realidad no es coherente. Una metodología adecuada y una forma de trabajo secuenciada con chequeos y conservación de copias de seguridad en momentos clave consiguen ahorrar mucho tiempo, sobre todo en la búsqueda de causas de errores.

Atendiendo al propio modelo de elementos finitos, se ha llegado a un diseño optimizado en gran medida, desde el punto de vista másico, de las bandejas que forman parte de la estructura del microsatélite. El hecho de que no se considere totalmente óptimo responde a que para conseguir ese grado de calidad sería necesario haber llevado a cabo infinitas iteraciones o al menos un gran número de ellas, haciendo una gran discretizando de los parámetros a variar. Para ello, se necesitaría un software especializado en esta optimización. Sin embargo, esto está fuera del alcance de este trabajo, por lo que se han realizado una serie de variaciones de las características de una bandeja genérica basada en las del UPMSat-2.

Con el modelo de bandeja resultante diseñado para que cumpla con las especificaciones técnicas pedidas en el enunciado, en este caso se ha garantizado una frecuencia fundamental del sistema bandeja-equipos embarcado entre 150 Hz y 175 Hz, se ha procedido a diseñar la estructura de un microsatélite alrededor de cuatro bandejas como las obtenidas previamente. En este caso, la estructura global se ha creado para que cumpla los requisitos de rigidez lateral de 45 Hz y longitudinal de 90 Hz.

Posteriormente a la etapa de diseño, se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de la respuesta del sistema a diferentes cargas, basadas en las que se encontrará el microsatélite en su fase de operación. Estas cargas vienen definidas por las solicitudes que se va a encontrar el vehículo en la etapa de lanzamiento, que suponen las cargas más exigentes de todo el ciclo de vida de un satélite, de forma general. Usualmente, los requisitos en cuanto a las cargas estructurales que debe soportar un satélite embarcado en un vehículo lanzador vienen definidas por la empresa que fabrica y opera el propio lanzador, y se pueden encontrar en el manual de este. En el caso de estudio, estas cargas vienen definidas por el enunciado, que proporciona valores similares a los que se pueden encontrar en los manuales de los lanzadores más comunes.

Para verificar que el microsatélite puede soportar dichas cargas se han llevado a cabo diversos tipos de análisis mediante el software Nastran. Estos comprenden análisis de modos propios, de carga estática en los tres ejes, sinusoidales en los tres ejes y de vibraciones aleatorias también en los tres ejes.

Finalmente, se han realizado los cálculos de los distintos márgenes de seguridad tanto para esfuerzos en los elementos unidimensionales y bidimensionales, como para las fuerzas que aparecen en los tornillos para cada uno de los casos de carga que se han mencionado anteriormente. De estos resultados se ha comprobado que la mayoría de los márgenes de seguridad en esfuerzos son superiores a 0, y que para el caso de los márgenes en fuerza se encuentra un mayor número de estos, ocurriendo en su mayor parte con los casos de carga sinusoidales y de vibraciones aleatorias.

5. Bibliografía

- García Pérez, A., Fernández de Toro Espejel, J. J. 2019 Manual de cálculo estructural *Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio Da Riva*
- García Pérez, A., Fernández de Toro Espejel, J. J. 2019 Manual de cálculo estructural: Anexos *Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio Da Riva*
- MSC Software 2018 Nastran Quick Reference Guide *MSC Software*